

**Universidad de Málaga**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación**



**Tesis Doctoral**

# **HETEROGENEOUS CELLULAR NETWORKS UNDER DIVERSE COUPLING AND ASSOCIATION CRITERIA**

Autor

**Muhammad Mujtaba Shaikh**

Máster Universitario en de Telecomunicación

Directora

**María del Carmen Aguayo Torres**


Doctor Ingeniero de Telecomunicación

**Año 2017**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

AUTOR: Muhammad Mujtaba Shaikh

 <http://orcid.org/0000-0001-9604-2819>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización  
pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer  
obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de  
Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)

**UNIVERSIDAD DE MÁLAGA**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN**

Reunido el tribunal examinador en el día de la fecha, constituido por:

Presidente: Dr. D. \_\_\_\_\_

Secretario: Dr. D. \_\_\_\_\_

Vocal: Dr. D. \_\_\_\_\_

para juzgar la Tesis Doctoral titulada “**Heterogeneous Cellular Networks under Diverse Coupling and Association Criteria**”, presentada por D. Muhammad Mujtaba Shaikh y dirigida por Dra. D<sup>a</sup>. María del Carmen Aguayo Torres

acordó por \_\_\_\_\_ otorgar la calificación de

\_\_\_\_\_  
y, para que conste, se extiende firmada por los componentes del tribunal la presente diligencia.

Málaga, a \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

El presidente:

El secretario:

El vocal:

Fdo: \_\_\_\_\_

Fdo: \_\_\_\_\_

Fdo: \_\_\_\_\_



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

il

Departamento de Ingeniería de Comunicaciones

Dra. D<sup>a</sup> María del Carmen Aguayo Torres, profesora del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Málaga,

**CERTIFICA:**

Que D. Muhammad Mujtaba Shaikh ha realizado en el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Málaga, bajo su dirección, el trabajo de investigación correspondiente a su TESIS DOCTORAL titulada:

“Heterogeneous cellular networks under diverse coupling and association criteria”

En dicho trabajo se han propuesto aportaciones originales para la evaluación del rendimiento de redes celulares heterogéneas bajo diversos criterios de acoplamiento y asociación. Concretamente, se ha evaluado la distribución conjunta de las relaciones señal a ruido más interferencia para los enlaces ascendente y descendente tanto si la asociación está acoplada como si se permite que sea a celdas diferentes. Se han presentado indicadores de rendimiento novedosos como la tasa de transmisión simétrica. Se ha analizado el efecto de un amplio conjunto de parámetros del sistema considerando el límite por señalización en el número de usuarios simultáneos en una celda y un diseño realista de la modulación y codificación adaptativa.

Por todo ello, considero que esta Tesis es apta para su presentación al Tribunal que ha de juzgarla. Y para que conste, AUTORIZO la presentación de esta Tesis en la Universidad de Málaga.

Málaga, a 11 de enero de 2017

Fdo: M<sup>a</sup> Carmen Aguayo Torres

UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



# Table of Contents

Table of Contents	iii
List of Tables	vii
List of Figures	viii
Acknowledgements	xxiii
Abstract	xxvii
Resumen	xxxix
List of Acronyms	xxxix
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Contributions of the dissertation . . . . .	6
1.3 Outline of the dissertation . . . . .	7
1.4 Related publications . . . . .	7
<b>2 Overview of Heterogeneous Cellular Networks and Poisson Point Processes</b>	<b>9</b>
2.1 Introduction . . . . .	9
2.2 Heterogeneous cellular networks . . . . .	10
2.2.1 Distributed antenna systems . . . . .	11
2.2.2 Microcells . . . . .	11
2.2.3 Picocells . . . . .	11
2.2.4 Femtocells . . . . .	12
2.3 Key aspects and challenges of heterogeneous cellular networks . . . . .	13
2.3.1 Cell association and load balancing . . . . .	13

2.3.2	Small cell densification and intercell interference . . . . .	13
2.3.3	Self-organizing networks . . . . .	14
2.3.4	Handover . . . . .	15
2.3.5	Energy efficiency . . . . .	15
2.4	Future heterogeneous cellular networks . . . . .	15
2.4.1	Cloud RAN . . . . .	16
2.4.2	Millimeter wave communications and massive MIMO . . . . .	16
2.4.3	Big Data analytics . . . . .	17
2.5	Poisson point processes . . . . .	17
<b>3</b>	<b>System Model and Association Criteria</b>	<b>21</b>
3.1	Introduction . . . . .	21
3.2	System model . . . . .	23
3.2.1	Channel model . . . . .	24
3.3	Cell range expansion . . . . .	25
3.4	Downlink user association . . . . .	28
3.4.1	Nearest BS association . . . . .	28
3.4.2	Strongest average BS association . . . . .	29
3.5	Uplink user association . . . . .	30
3.6	Fractional power control . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Various Performance Indicators of Heterogeneous Cellular Networks</b>	<b>35</b>
4.1	Introduction . . . . .	35
4.2	SINR coverage . . . . .	37
4.3	Cell load . . . . .	39
4.4	Spectral efficiency . . . . .	39
4.5	Binary rate . . . . .	41
4.6	Energy efficiency . . . . .	43
4.7	Fairness . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Numerical Results</b>	<b>45</b>
5.1	Introduction . . . . .	45
5.2	Distribution of main performance indicators for default system parameters . . . . .	46
5.2.1	SINR coverage . . . . .	46
5.2.2	Spectral efficiency . . . . .	54
5.2.3	Binary rate . . . . .	62
5.3	Effects of system design parameters on system performance . . . . .	64

5.3.1	User density and limit of associated users . . . . .	66
5.3.2	Pico density and biasing . . . . .	77
5.3.3	UL fractional power control parameters . . . . .	91
<b>6</b>	<b>Conclusions</b>	<b>95</b>
6.1	Summary . . . . .	95
6.2	Future research directions . . . . .	98
<b>A</b>	<b>Resumen en español</b>	<b>101</b>
A.1	Introducción . . . . .	101
A.1.1	Motivación . . . . .	101
A.1.2	Contribuciones de la tesis . . . . .	105
A.1.3	Esquema de la tesis . . . . .	106
A.1.4	Publicaciones relacionadas . . . . .	106
A.2	Visión de conjunto de las redes celulares heterogéneas y los procesos punto de Poisson . . . . .	107
A.2.1	Redes celulares heterogéneas . . . . .	108
A.2.2	Aspectos clave y desafíos en las redes celulares heterogéneas actuales . . . . .	109
A.2.3	Algunos aspectos en las redes celulares heterogéneas futuras . . . . .	111
A.3	Modelo de sistema y criterios de asociación . . . . .	113
A.3.1	Modelo de sistema . . . . .	115
A.3.2	Criterios de asociación en el enlace descendente . . . . .	120
A.3.3	Criterios de asociación en el enlace ascendente . . . . .	122
A.3.4	Control de potencia fraccional . . . . .	124
A.4	Indicadores de rendimiento . . . . .	125
A.4.1	Cobertura de SINR . . . . .	126
A.4.2	Carga de la celda . . . . .	128
A.4.3	Eficiencia espectral simétrica . . . . .	129
A.4.4	Tasa binaria . . . . .	130
A.4.5	Eficiencia energética . . . . .	131
A.4.6	Justicia . . . . .	132
A.5	Resultados numéricos . . . . .	132
A.5.1	Distribución de los principales indicadores para los parámetros por defecto . . . . .	132
A.5.2	Efecto en el sistema de los parámetros de diseño . . . . .	149
A.6	Conclusiones y líneas futuras . . . . .	176
A.6.1	Resumen . . . . .	176
A.6.2	Líneas futuras de trabajo . . . . .	179

## Bibliography

183



# List of Tables

3.1	Association summary. . . . .	31
5.1	System parameters, notation and default simulation values. . . . .	46
5.2	System performance indicator notation. . . . .	47
5.3	Simulation switching thresholds for adaptive modulation and coding.	61
A.1	Resumen de criterios de asociación. . . . .	123
A.2	Parámetros del sistema, notación y valores de simulación por defecto.	134
A.3	Indicadores clave de rendimiento del sistema. . . . .	135
A.4	Umbrales de conmutación entre esquemas de modulación y codificación obtenidos del simulador LTE. . . . .	145



# List of Figures

2.1	Realization of a Poisson point process with $\lambda = 100$ . . . . .	18
3.1	System model showing decoupled association for user 0. Interference signals by transmissions to/from user z are also shown. . . . .	24
3.2	Cell range expansion concept. . . . .	26
5.1	Marginal uplink and downlink coverage probabilities for association to the nearest BS (C1). . . . .	48
5.2	Marginal uplink and downlink coverage probabilities for average association case (C2). . . . .	48
5.3	Marginal uplink and downlink coverage probabilities for average association in downlink and minimum path loss in uplink (C3). . . . .	49
5.4	Comparison of marginal uplink coverage probabilities for C1, C2 and C3 cases under $\epsilon = 0$ and 1. . . . .	49
5.5	Enlarge view of comparison of marginal uplink coverage probabilities for C1, C2 and C3 cases under $\epsilon = 0$ and 1. . . . .	50
5.6	Marginal uplink, marginal downlink, joint uplink/ downlink coverage probabilities and product of uplink and downlink coverage probabilities for nearest BS association criteria with $\epsilon = 1$ . . . . .	52
5.7	Marginal uplink, marginal downlink, joint uplink and downlink coverage probabilities and product of uplink and downlink coverage probabilities for average BS association criteria with $\epsilon = 1$ . . . . .	53



5.8	Marginal uplink, marginal downlink, joint uplink and downlink coverage probabilities and product of uplink and downlink coverage probabilities for average BS association criteria in DL and minimum path loss association in UL with $\epsilon = 1$ . . . . .	53
5.9	Joint uplink/downlink transmission success probability for three association criteria compared to the probability evaluated from independence assumption. . . . .	54
5.10	Shannon and LTE Simulator Spectral Efficiency with simulation switching thresholds for Adaptive Modulation and Coding (AMC). . .	55
5.11	Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C1 association criteria with $\epsilon = 0$ . . . . .	56
5.12	Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C1 association criteria with $\epsilon = 0.5$ . . . . .	56
5.13	Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C1 association criteria with $\epsilon = 1$ . . . . .	57
5.14	Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C2 association criteria with $\epsilon = 0$ . . . . .	57
5.15	Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C2 association criteria with $\epsilon = 0.5$ . . . . .	58
5.16	Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C2 association criteria with $\epsilon = 1$ . . . . .	58

5.17	Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C3 association criteria with $\epsilon = 0$ . . . . .	59
5.18	Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C3 association criteria with $\epsilon = 0.5$ . . . . .	59
5.19	Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C3 association criteria with $\epsilon = 1$ . . . . .	60
5.20	Joint uplink/downlink spectral efficiency coverage for C1, C2 and C3 association criteria with $\epsilon = 1$ . . . . .	60
5.21	Marginal uplink, marginal downlink and joint AMC binary rate coverage probabilities for association to the nearest BS (association criteria C1). ( $x$ in Mbps.) . . . . .	63
5.22	Marginal uplink, marginal downlink and joint AMC binary rate coverage probabilities for average association in DL and coupled UL (association criteria C2). ( $x$ in Mbps.) . . . . .	64
5.23	Marginal uplink, marginal downlink and joint AMC binary rate coverage probabilities for average association in DL and minimum path loss in UL (association criteria C3). ( $x$ in Mbps.) . . . . .	65
5.24	Percent of empty macro and pico BSs under C1, C2 and C3 criteria with $\gamma = 1, 10$ and $60$ . . . . .	66
5.25	Impact of $\gamma$ on marginal uplink and downlink coverage probabilities for association criteria C1. . . . .	67
5.26	Impact of $\gamma$ on marginal uplink and downlink coverage probabilities for association criteria C2. . . . .	68
5.27	Impact of $\gamma$ on marginal uplink and downlink coverage probabilities for association criteria C3. . . . .	68



5.28	System performance as a function of the user density ratio $\gamma = \lambda_u/\lambda_{BS}$ .	
	a) Average percentage of users connected to macro/pico base stations.	
	b) Average load for non-empty BSs. c) Average percentage of inactive users for macro/pico base stations. d) Average percent of users in Outage. e) Average DL/UL spectral efficiencies for AMC. f) Average DL/UL binary data rate for AMC. . . . .	70
5.28	System performance as a function of the user density ratio $\gamma = \lambda_u/\lambda_{BS}$ .	
	g) Joint rate for AMC and Shannon limit. h) Jain's index for marginal rates (AMC and Shannon limit). i) Average DL energy efficiency for active users. j) Average UL energy efficiency for active users. . . . .	71
5.29	System performance as a function of users' limit $N_{max}$ . a) Average percentage of users connected to macro/pico base stations. b) Average load for non-empty BSs. c) Average percentage of inactive users for macro/pico base stations. d) Average percent of users in Outage. e) Average DL/UL spectral efficiencies for AMC. f) Average DL/UL binary data rate for AMC. . . . .	75
5.29	System performance as a function of users' limit $N_{max}$ . g) Joint rate for AMC and Shannon limit. h) Jain's index for marginal rates (AMC and Shannon limit) i) Average DL energy efficiency for active users. j) Average UL energy efficiency for active users. . . . .	76
5.30	Average percent of macro and pico BSs in a network ( $\beta = 2, 4, 8$ ). . .	78
5.31	Percent of empty macro and pico BSs under C1, C2 and C3 criteria ( $\beta = 2, 4, 8$ ). . . . .	79
5.32	Impact of $\beta$ on marginal uplink and downlink coverage probabilities for association criteria C1. . . . .	79
5.33	Impact of $\beta$ on marginal uplink and downlink coverage probabilities for association criteria C2. . . . .	80
5.34	Impact of $\beta$ on marginal uplink and downlink coverage probabilities for association criteria C3. . . . .	80

5.35	Average Intended UL UE Power in dBm under criteria C2 without power control ( $\beta = 2, 4, 8$ ). . . . .	81
5.36	System performance as a function of their densities' ratio, $\beta = \lambda_p/\lambda_M$ . a) Average percentage of users connected to macro/pico base stations. b) Average load for non-empty BSs. c) Average percentage of inactive users for macro/pico base stations. d) Average percent of users in Outage. e) Average DL/UL spectral efficiencies for AMC; f) Average DL/UL binary data rate for AMC. . . . .	83
5.36	System performance as a function of their densities' ratio, $\beta = \lambda_p/\lambda_M$ . g) Joint rate for AMC and Shannon limit. h) Jain's index for marginal rates (AMC and Shannon limit) i) Average DL energy efficiency for AMC. j) Average UL energy efficiency for AMC. . . . .	84
5.37	Impact on marginal uplink and downlink coverage probabilities for association criteria C2 with $\tau = 0dB, 16dB$ and $32dB$ . . . . .	85
5.38	Percentage of empty macro and pico BSs under C1, C2 and C3 criteria with $\tau = 0dB, 16dB$ and $32dB$ . . . . .	86
5.39	System performance as a function of pico range expansion bias, $\tau$ . a) Average percentage of users connected to macro/pico base stations. b) Average load for non-empty BSs. c) Average percentage of inactive users for macro/pico base stations. d) Average percent of users in Outage. e) Average DL/UL spectral efficiencies for AMC. f) Average DL/UL binary data rate for AMC. . . . .	88
5.39	System performance as a function of pico range expansion bias, $\tau$ . g) Joint rate for AMC and Shannon limit. h) Jain's index for marginal rates (AMC and Shannon limit). i) Average DL energy efficiency for AMC. j) Average UL energy efficiency for AMC. . . . .	89

5.40	System performance as a function of power control index, $\epsilon$ and no range expansion $\tau = 0$ . a) Spectral efficiency for AMC. (Results for DL, not a function of $\epsilon$ , shown as reference.) b) Joint average rate for AMC and Shannon limit. . . . .	90
5.41	System performance as a function of power control index, $\epsilon$ and range expansion bias $\tau = 32$ . a) Spectral efficiency for AMC. (Results for DL, not a function of $\epsilon$ , shown as reference.) b) Joint average rate for AMC and Shannon limit. . . . .	90
5.42	Jain's index as a function of power control index, $\epsilon$ . a) $\tau = 0dB$ (no range expansion). b) $\tau = 32dB$ . (Only average criteria results are shown.) . . . . .	91
5.43	Impact on marginal uplink coverage probability for association criteria C3 with $P_u = 0dBm$ , $15dBm$ and $23dBm$ . . . . .	92
5.44	Average percent of users in outage with growing $P_u$ . . . . .	92
5.45	System performance as a function of open loop user transmission power, $P_u$ and no power control. a) Spectral efficiency for AMC. (Results for DL are shown for comparison.) b) Joint rate for AMC and Shannon limit. . . . .	93
5.46	Jain's index as a function of of open loop user transmission power, $P_u$ . a) $\epsilon = 0$ (no power control). b) $\epsilon = 0.2$ . . . . .	93
A.1	Realización de un proceso de punto de Poisson con $\lambda = 100$ . . . . .	114
A.2	Modelo de sistema que muestra la asociación desacoplada para el usuario $z$ . Las señales que interfieren con dicho usuario también se muestran. . . . .	116
A.3	Modelo de expansión de rango celular . . . . .	118
A.4	CCDF para la SINR de los enlaces ascendente y descendente para el criterio C1. . . . .	133
A.5	CCDF para la SINR de los enlaces ascendente y descendente para el criterio C2. . . . .	133





A.6	CCDF para la SINR de los enlaces ascendente y descendente para el criterio C3. . . . .	135
A.7	Probabilidades de cobertura conjuntas y marginales para los enlaces ascendentes y descendentes para el criterio C1 y $\epsilon = 1$ . Se muestra también el producto de ambas marginales. . . . .	137
A.8	Probabilidades de cobertura conjuntas y marginales para los enlaces ascendentes y descendentes para el criterio C2 y $\epsilon = 1$ . Se muestra también el producto de ambas marginales. . . . .	138
A.9	Probabilidades de cobertura conjuntas y marginales para los enlaces ascendentes y descendentes para el criterio C3 y $\epsilon = 1$ . Se muestra también el producto de ambas marginales. . . . .	138
A.10	Probabilidad de cobertura conjuntas comparada con la probabilidad evaluada asumiendo que son independientes. . . . .	139
A.11	Eficiencia espectral para el límite de Shannon y con los umbrales obtenidos del simulador LTE para modulación y codificación adaptativa en función de la SINR. . . . .	140
A.12	CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C1, $\epsilon = 0$ . . . . .	140
A.13	CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C1, $\epsilon = 0.5$ . . . . .	141
A.14	CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C1, $\epsilon = 1$ . . . . .	141
A.15	CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C2, $\epsilon = 0$ . . . . .	142



A.16 CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C2, $\epsilon = 0.5$ . . . . .	142
A.17 CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C2, $\epsilon = 1$ . . . . .	143
A.18 CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C3, $\epsilon = 0$ . . . . .	143
A.19 CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C3, $\epsilon = 0.5$ . . . . .	144
A.20 CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C3, $\epsilon = 1$ . . . . .	144
A.21 CCDF de la velocidad binaria conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C1. ( $x$ in Mbps.) . . . . .	147
A.22 CCDF de la velocidad binaria conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C2. ( $x$ in Mbps.) . . . . .	147
A.23 CCDF de la velocidad binaria conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C3. ( $x$ in Mbps.) . . . . .	148

A.24 Rendimiento del sistema en función de la relación de densidad de usuario $\gamma = \lambda_u/\lambda_{BS}$ . a) Porcentaje medio de usuarios conectados a las estaciones base. b) Carga media para las BS no vacías. c) Porcentaje medio de usuarios inactivos. d) Porcentaje medio de usuarios en interrupción. e) Eficiencia espectral promedio para AMC; f) Tasa binaria promedio para AMC. . . . .	151
A.24 Rendimiento del sistema en función de la relación de densidad de usuario $\gamma = \lambda_u/\lambda_{BS}$ . g) Tasa conjunta promedio para AMC y para el límite de Shannon. h) Índice de Jain para la tasa binaria para AMC y para el límite de Shannon. i) Eficiencia energética media en el DL para usuarios activos. j) Eficiencia energética media en el UL para usuarios activos. . . . .	152
A.25 Rendimiento del sistema en función del límite de usuarios $N_{max}$ . a) Porcentaje medio de usuarios conectados a las estaciones base. b) Carga media para las BS no vacías. c) Porcentaje medio de usuarios inactivos. d) Porcentaje medio de usuarios en interrupción. e) Eficiencia espectral promedio para AMC; f) Tasa binaria promedio para AMC. . . . .	155
A.25 Rendimiento del sistema en función del límite de usuarios $N_{max}$ . g) Tasa conjunta promedio para AMC y para el límite de Shannon. h) Índice de Jain para la tasa binaria para AMC y para el límite de Shannon. i) Eficiencia energética media en el DL para usuarios activos para AMC. j) Eficiencia energética media en el UL para usuarios activos para AMC. . . . .	156
A.26 Porcentaje promedio de macro y pico celdas en la red ( $\beta = 2, 4, 8$ ). .	159
A.27 Porcentaje de macro y pico celdas vacías bajo los criterios C1, C2 y C3 ( $\beta = 2, 4, 8$ ). . . . .	159
A.28 Impacto de $\beta$ en las probabilidades marginales de cobertura para el enlace ascendente y descendente bajo el criterio de asociación C1. . .	160

A.29 Impacto de $\beta$ en las probabilidades marginales de cobertura para el enlace ascendente y descendente bajo el criterio de asociación C2. . .	160
A.30 Impacto de $\beta$ en las probabilidades marginales de cobertura para el enlace ascendente y descendente bajo el criterio de asociación C3. . .	161
A.31 Promedio de energía en el enlace ascendente (dBm) bajo el criterio C2 sin control de potencia ( $\beta = 2, 4, 8$ ). . . . .	161
A.32 Rendimiento del sistema en función del cociente entre las densidades de macro y picoceldas, $\beta = \lambda_p/\lambda_M$ . a) Porcentaje medio de usuarios conectados a las estaciones base. b) Carga media para las BS no vacías. c) Porcentaje medio de usuarios inactivos. d) Porcentaje medio de usuarios en interrupción. e) Eficiencia espectral promedio para AMC; f) Tasa binaria promedio para AMC. . . . .	164
A.32 Rendimiento del sistema en función del cociente entre las densidades de macro y picoceldas, $\beta = \lambda_p/\lambda_M$ . g) Tasa conjunta promedio para AMC y para el límite de Shannon. h) Índice de Jain para la tasa binaria para AMC y para el límite de Shannon. i) Eficiencia energética media en el DL para usuarios activos para AMC. j) Eficiencia energética media en el UL para usuarios activos para AMC. . . . .	165
A.33 Impacto en las probabilidades marginales de cobertura de enlace ascendente y descendente para el criterio de asociación C2 con $\tau = 0dB, 16dB$ y $32dB$ . . . . .	166
A.34 Porcentaje de BS vacías de macro y pico bajo los criterios C1, C2 y C3 con $\tau = 0dB, 16dB$ y $32dB$ . . . . .	167
A.35 Rendimiento del sistema en función del sesgo de expansión de celda, $\tau$ . aa) Porcentaje medio de usuarios conectados a las estaciones base. b) Carga media para las BS no vacías. c) Porcentaje medio de usuarios inactivos. d) Porcentaje medio de usuarios en interrupción. e) Eficiencia espectral promedio para AMC; f) Tasa binaria promedio para AMC. . . . .	170

A.35 Rendimiento del sistema en función del sesgo de expansión de celda, $\tau$ . g) Tasa conjunta promedio para AMC y para el límite de Shannon. h) Índice de Jain para la tasa binaria para AMC y para el límite de Shannon. i) Eficiencia energética media en el DL para usuarios activos para AMC. j) Eficiencia energética media en el UL para usuarios activos para AMC. . . . .	171
A.36 Rendimiento del sistema en función del índice del control de potencia, $\epsilon$ . No se ha considerado expansión del rango de celda( $\tau = 0$ ). a) Eficiencias espectrales promedio para AMC. (Los resultados para DL, que no son función de <i>epsilon</i> , se muestran como referencia.) b) Tasa conjunta promedio para AMC y para el límite de Shannon. . . . .	172
A.37 Rendimiento del sistema en función del índice del control de potencia, $\epsilon$ . Se ha considerado expansión del rango de celda( $\tau = 32$ ). a) Eficiencias espectrales promedio para AMC. (Los resultados para DL, que no son función de <i>epsilon</i> , se muestran como referencia.) b) Tasa conjunta promedio para AMC y para el límite de Shannon. . . . .	172
A.38 índice de Jain en función del índice del control de potencia, $\epsilon$ , para el criterio de mejor potencia media (C2). a) $\tau = 0dB$ (sin expansión de rango). b) $\tau = 32dB$ . . . . .	173
A.39 Impacto en la probabilidad marginal de cobertura del enlace ascendente para el criterio de asociación C3 con $P_u = 0dBm$ , $15dBm$ y $23dBm$ . .	173
A.40 Promedio de porcentaje de usuarios en interrupción en función de $P_u$ . .	174
A.41 Rendimiento del sistema en función de la potencia de usuario en bucle abierto, $P_u$ sin control de potencia. a) Eficiencias espectrales promedio para AMC. (Los resultados para DL, que no son función de $P_u$ , se muestran como referencia.); b) Tasa conjunta promedio para AMC y para el límite de Shannon. . . . .	174

A.42 índice de Jain en función de la potencia de transmisión del usuario en bucle abierto, $P_u$ , para el criterio de mejor potencia media (C2). a) $\epsilon = 0$ (sin control de potencia); b) $\epsilon = 0.2$ . . . . .	175
--	-----

*Dedicated to my family.*





# Acknowledgements

I would like to express my sincere respect and gratitude to my thesis supervisor, Dr. Mari Carmen Aguayo-Torres. She always spared time from her busy schedule for discussions and one to one meetings to guide me. I am fortunate enough to have been working under her supervision and without her support and guidance, it was impossible to complete my research work. I learned many professional and non-professional things from her. Besides many other skills, most of the improvement in my technical writing and presentation skills is attributed to her because of her critical comments and feedback. She is brilliant and wonderful both professionally and personally.

I gratefully acknowledge the financial support for my doctoral research by the Government of Pakistan, Higher Education Commission (HEC), Islamabad, Pakistan and Quaid-e-Awam University of Engineering, Science & Technology, Nawabshah, Pakistan.

I am also very thankful to Spanish Government and University of Malaga that this work has been partially supported by the Spanish Government (Ministerio de Economía y Competitividad) under grants TEC2013-44442-P and TEC2016-80090-C2-1-R, and by the University of Malaga.

I am thankful to all my colleagues specially Francisco Martin Vega, Isabel Maria Delgado Luque, Alberto Carreras Mesa and Jose Miguel for their help and support in Comunicacion Moviles laboratory, at the University of Malaga, Spain.

Finally, I express my special gratitude towards my family, my wife Bushra and children M. Mubashir, Maham Fatima, and Rumesa Fatima for their love and support.





# Abstract

Current networks are moving towards Heterogeneous Cellular Networks (HCN) arising from the combination of small cells with existing macrocells. The small cells are low power nodes such as microcells, picocells and femtocells. Each layer (tier) of the network contains all the elements of a certain type of cells, which transmit with the same power.

The aim of this thesis is to analyze various performance indicators of heterogeneous cellular networks. Investigation includes the specific consideration of symmetric transmission and, therefore, of joint distributions. A two-layer heterogeneous cellular network has been considered in which macro and pico cell Base Stations (BS) and User Equipment (UE) are evenly distributed. Realistic path loss models have been taken into account for both macro and pico tiers.

This thesis focuses on the criteria by which user equipment is associated with base stations. It can be done to the nearest cell in physical distance or the radio electric distance can be used, that is to say, the propagation losses. As the powers used by distinct layers at heterogeneous networks are different, a common criterion is to associate the user equipment to the base station that is received with higher average power. For this case, we have taken into account the technique known as Cell Range Expansion (CRE) that tends to equalize the user sharing between macro and pico cells which, owing to the power difference, is otherwise very unbalanced.

As for the uplink, networks currently in operation always associate user with the same cell that is considered for the downlink. New network architectures seem to allow the possibility of decoupling both associations. This thesis evaluates the gain

obtained to analyze if it compensates its implementation difficulties. Fractional Power Control (FPC), which allows partial compensation of uplink losses, is also taken into account.

First, the distribution of Signal-to-Noise plus Interference Ratio (SINR) in both upstream and downstream links has been analyzed. Then, the symmetrical spectral efficiency, which simultaneously satisfies both uplink and downlink needs, is evaluated. Realistic spectral efficiencies such as those signaled by the LTE channel quality indicators are used in this thesis. The binary rate assigned to users is calculated while considering realistic limits to the number of users that can be simultaneously active in a cell. The association criteria influence in a determinant way in the load of the cells and in the resources available for each user. The results show that taking into account realistic values of spectral efficiency and a maximum number of users significantly modifies the results of the joint binary rate. Thus, although the spectral efficiency in the downlink is maximum for the association by average power, its binary rate is not necessarily the highest. Since the macrocell base stations are heavily loaded, many users are inactive and are not assigned any resources.

Other parameters of the network have also been studied, such as the average number of users per cell. Deploying denser infrastructure not only improves coverage and average rates, but also energy efficiency and equal sharing. Limiting the number of simultaneous active users does not affect the coverage and average symmetric binary rate but energy efficiency improves for lower values of  $N_{max}$ , since the resources of the cell are distributed among less users, at the expense of an unfaier treatment as more users are kept inactive. The inclusion of more pico cells (while maintaining the total density of base stations) is not worthy under all association criteria. Specifically, the equity of the rate distribution is notably worsen if the association is performed by average power due to the high power difference between the two layers, although the energy efficiency is improved. The utilization of cell range expansion bias reduces coverage but fairness is maximum for its mid range values and the energy efficiency as well as the binary rate has improved much beyond those mid range values. Finally,

partially compensating propagation losses improves the joint coverage and rate and provides better treatment among users. Our results show that for realistic path loss models, the decoupled DL/UL association does not improve the results sufficiently to compensate for the implementation difficulties it represents.



# Resumen

Las redes actuales están dirigiéndose hacia convertirse en redes celulares heterogéneas (Heterogeneous Cellular Network, HCN) que surgen de la combinación de celdas pequeñas con macroceldas existentes. Las celdas pequeñas son nodos de baja potencia como microceldas, picoceldas y femtoceldas. Cada capa de la red contiene todos los elementos de un cierto tipo de celdas, que transmiten con la misma potencia.

El objetivo de esta tesis es analizar diversos indicadores de rendimiento de redes celulares heterogéneas. Se ha considerado específicamente la simetría en la transmisión y, por tanto, las distribuciones conjuntas. Se ha evaluado una red celular de dos capas en la que se distribuyen uniformemente estaciones base (Base Stations, BS) de macro y picocelda y equipos de usuario (User Equipment, UE).

La tesis se centra en los criterios por los que los equipos de usuario se asocian a las estaciones base. Puede hacerse a la celda más cercana en distancia física o puede emplearse la distancia radioeléctrica, es decir, las pérdidas de propagación. Como las potencias empleadas en una red heterogénea son diferentes para cada capa, un criterio habitual es asociar el equipo de usuario a la estación base que se reciba con mayor potencia media. Para este caso, se ha tenido en cuenta la técnica conocida como ampliación de rango de celda (Cell Range Expansion, CRE). Este mecanismo pretende igualar el reparto de usuarios entre macro y pico celdas que, debido a la diferencia de potencias, estaría en otro caso muy desequilibrado.

En cuanto al enlace ascendente, las redes actualmente en funcionamiento siempre lo asocian a la misma celda que se consideró para el enlace descendente. Nuevas arquitecturas de red parecen permitir la posibilidad de desacoplar ambas asociaciones.

Esta tesis analiza la ganancia obtenida con el desacoplo entre ambos enlaces para ver si compensa las dificultades de su implementación. Se tiene en cuenta el control de potencia fraccional (Fractional Power Control, FPC), que permite compensar parcialmente las pérdidas en el enlace ascendente.

En primer lugar, se ha analizado la distribución de las relaciones señal a ruido más interferencia en ambos enlaces, ascendente y descendente. Se define entonces la eficiencia espectral simétrica, que reúne el enlace ascendente y el descendente y obliga a ambos. Se utilizan eficiencias espectrales realistas como las señalizadas en LTE. Para el cálculo de la velocidad binaria asignada a los usuarios se consideran límites realistas en el número de usuarios activos simultáneamente en una celda. Los criterios de asociación influyen de forma determinante en la carga de las celdas y en los recursos disponibles para cada usuario. Los resultados muestran que tomar en consideración valores realistas de eficiencia espectral y un número máximo de usuarios modifica de manera notable los resultados de la tasa binaria conjunta. Así, aunque la eficiencia espectral en el enlace descendente es máxima para la asociación por potencia media, su tasa binaria no es necesariamente la más alta ya que, al estar muy cargadas las estaciones base de macrocelda, muchos usuarios están inactivos y no se les asigna ningún recurso.

Se han estudiado también otros parámetros de la red, como el número medio de usuarios por celda. El despliegue de una infraestructura más densa (es decir, aumentar la densidad de estaciones base) no sólo mejora la cobertura y la tasa binaria promedio, sino también la eficiencia energética y la equidad en el reparto. Limitar el número de usuarios activos simultáneos no afecta a la cobertura ni a la tasa binaria simétrica media pero la eficiencia energética mejora, ya que los recursos de la celda se distribuyen entre menos usuarios, a costa de un tratamiento más injusto a medida que más usuarios se mantienen inactivos. La inclusión de más picoceldas (al tiempo que se mantiene la densidad total de estaciones base) no tiene interés bajo ningún criterio de asociación. Específicamente, la equidad en el reparto de la tasa binaria empeora notablemente si la asociación se realiza por potencia media debido a la



elevada diferencia de potencias, aunque mejore la eficiencia energética. La utilización de la expansión del rango de celda reduce la cobertura, pero la equidad es máxima para valores medios del sesgo mientras tanto la velocidad binaria como la eficiencia energética mejoran para valores mucho mayores. Por último, compensar parcialmente las pérdidas de propagación mejora la tasa conjunta y proporciona un tratamiento entre usuarios más justo. Nuestros resultados muestran que, para modelos de pérdidas de camino realistas, la asociación DL/UL desacoplada no mejora los resultados lo suficiente para compensar las dificultades de implementación que representa.



# List of Acronyms

**3GPP** Third Generation Partnership Project

**4G** Fourth Generation

**5G** Fifth Generation

**ABS** Almost Blank Subframes

**AMC** Adaptive Modulation and Coding

**BBU** Base Band Unit

**BLER** Block Error Rate

**BS** Base station

**C-RAN** Cloud-Radio Access Network

**CA** Carrier Aggregation

**CC** Carrier Component

**CCDF** Complementary Cumulative Distribution Function

**COMP** Coordinated Multipoint Transmission and Reception

**CRE** Cell Range Expansion

**CSG** Closed Subscriber Group

**DAS** Distributed Antenna System

**dB** Decibels

**DL** Downlink

**E-UTRAN** Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network

**EE** Energy Efficiency

**eICIC** Enhanced Inter-cell Interference Coordination

**FAP** Femto Access Point

**FD** Full Duplex

**feICIC** Further Enhanced Inter-cell Interference Coordination

**FPC** Fractional Power Control

**HCN** Heterogeneous Cellular Network

**HD** Half Duplex

**HeNB** Home Evolved NodeB

**HNB** Home NodeB

**HSPA** High Speed Packet Access

**i.i.d** Independent and Identically Distributed

**JFI** Jain's Fairness Index

**LTE** Long Term Evolution

**MIMO** Multiple Input Multiple Output

**mmWave** Millimeter Wave

**MPL** Minimum Pathloss

**OFDMA** Orthogonal Frequency Division Multiple Access

**PPP** Poisson Point Process

**PSD** Power Spectral Density

**QoS** Quality of Service

**RF** Radio Frequency

**RN** Relay Node

**RRH** Remote Radio Head

**SE** Spectral Efficiency

**SINR** Signal to Interference plus Noise Ratio

**SNR** signal-to-Noise Ratio

**SON** Self Organizing Networks

**TSP** Transmission Success Probability

**Tx** Transmit

**UE** User Equipment

**UL** Uplink



# Chapter 1

## Introduction

### 1.1 Motivation

Heterogeneous Cellular Network (HCN) [1][2][3] is the combination of small cells with existing macrocells. The purpose of deployment of HCNs is to fulfill the demand of wireless data traffic which arises from the development of huge amount of mobile applications. The easiest way to improve the capacity and coverage is to add more spectrum for fulfilling the expected growth in data traffic. Unfortunately, this is not a cost efficient solution and the only way to improve the capacity and coverage is to densify the existing macrocellular network by the addition of small cells. The small cells are low power nodes of different types which include microcells, picocells, and femtocells. Each layer of the network contains all elements of a certain type, which transmit with the same power.

Association criteria, also known as selection criteria or association rules, are used to determine the BSs to which users are associated. In current networks, only coupled associations are possible, wherein the User Equipment (UE) is paired to the same BS for both uplink and downlink transmission. The association of users to cells in the heterogeneous network can be performed according to various criteria [4][5][6][7]. It

can be done to the nearest cell in physical distance or the radio electric distance can be used, that is to say, the losses of propagation. As the powers employed are different, a common criterion is to associate the User Equipment (UE) to the base station which is received with more average power. Association could also track instantaneous power but only if the network allows dynamic cell selection.

The association by power means that the areas that cover the different layers are very different. Most of the users are associated to macrocells, which generate an imbalance in the distribution. A widely used technique is the Cell Range Expansion (CRE) [8][9][10][11]. Basically, the power received from the picocell is added with a bias so that its coverage area is extended and users can be offloaded from macro to pico BSs. Obviously, users in this expanded zone receive poorer quality but also need to share cell resources with fewer competing users.

As for the uplink, technologies currently in operation always associate both links to the same cell. Fractional Power Control (FPC) [12][13][14][15][16] technique employed in the uplink partially compensates the path loss and shadowing from UE to BS to achieve a more fair resource sharing. It should be noted that even if communication is only unidirectional, there is a need of channel status information or channel coding feedback.

In recent years, the possibility of decoupling uplink (UL) and downlink (DL) associations by allowing the network architecture to exchange information quickly between BSs has arisen [5][6][7]. The advantages of decoupling include network throughput gains, improved coverage, and lower power consumption but this is only possible with major architectural changes in current Long Term Evolution-Advance (LTE-A) mobile networks. Feasibility will be ensured after implementation of the radio network in the cloud (Cloud Radio Access Network, C-RAN). Minimum path loss (MPL) criteria have been evaluated for UL which is equivalent to maximize the average received power at BS if no power control would be considered for the UE.



By the addition of small cells, the network is transformed into a dense network which is complex and difficult to analyze with traditional methods of communication theory. Stochastic geometry plays an important role to overcome this problem. This tool allows analysis of the average behavior of the network over many spatial realizations where the nodes are distributed following certain probability distribution [17].

A wide set of theoretical works on downlink transmission through stochastic geometry can be found in literature [18]. Most researchers focus on Signal-to-Noise plus Interference Ratio (SINR) evaluation [19], and several association criteria have been successfully analyzed such as led by maximum instantaneous received power [4], maximum biased average received power [19], and nearest base station (BS) [20].

A reduced group of works can be found for uplink. The association has sometimes been forced by the downlink (coupled) [16] while in others it has been allowed that the uplinks and downlinks communicate with distinct BSs (decoupled) [21]. Theoretical results are commonly obtained through a modified model whereby the UEs follow a uniform distribution but not the base stations [13]. This model is not valid for the downlink.

In the uplink analysis, it is necessary to take into account the common use of the power control so that different users associated to the same base station are received with similar levels of power. This mechanism is taken into account in previous work [12][13][14][15][16] but assuming that the power of the user equipment is unlimited is usual [12], despite legal limits to output power levels [22].

Spectral efficiency is defined as the information rate that can be transmitted over a given bandwidth in a communication system. It is a net bit rate of a communication channel, upper bounded by the well known Shannon limit for the spectral efficiency. A limited set of works include spectral efficiency in the performance analysis through the Shannon upper bound as an invertible monotonically increasing function of

SINR [10][21]. Moreover, although some works can be found considering Adaptive Modulation and Coding (AMC) instead of Shannon spectral efficiency [23], its effects on optimal biasing and power control has not been unveiled yet.

The number of users associated to a BS is termed as load [6][10][11][19][24][25]. In general, rate analysis is based on the mean load approximation, i.e., the average user load per BS is used instead of the actual BS load [7]. The average user load is sometimes evaluated as a linear transformation of the single-tier cell size distribution estimated from measurements [19]. As a result, different small cell base station power biases optimize average SINR and average rate [19].

Human communication, received through the physical senses, often requires a symmetric service. In some applications such as voice, social networks or video calls, the originated traffic is symmetric and the same minimum quality must be maintained on both sides of the communication. Other applications, such as cloud storage, are uplink intensive while for other notable applications, such as video streaming, downlink traffic is extremely high compared to uplink transmission, and only some feedback is needed for communication. However, even in these cases, a minimum uplink quality is required for purposes of signaling (e.g., acknowledgments and quality measures). The user may not obtain the required Quality of Service (QoS) from the network even if he is able to decode the downlink transmission but cannot connect via uplink. Thus, it is vital to analyze the joint performance of downlink and uplink transmissions as both should have quality enough to support the service.

Despite being critical to analyze the joint performance of downlink and uplink transmissions, less works can be found studying the joint downlink and uplink network performance. Approximations such as independence among UL and DL interference have been done to analyze the SINR for both uplink and downlink [26]. Modeling the uplink and downlink distributions of SINR as independent (as in [9]) is however arbitrary. Shannon rate distribution over the entire network have been derived in [12]

under the assumption of independence among UL and DL SINRs and BS loads, which is deceiving as user and base station density influence on both.

In this dissertation, we have assumed a two-tier heterogeneous cellular network with macro and pico Base Stations (BSs) and User Equipments (UEs) uniformly distributed and each forming a uniform Poisson Point Process (PPP). Two association criteria, to the nearest BS and to the BS with strongest average signal in the downlink, have been studied for the downlink. Uplink could be coupled to it or independently associated to the BS to which path losses are minimum. The joint uplink/downlink SINR distribution in two-tier heterogeneous cellular network have been analyzed using Monte Carlo method by considering the Third Generation Partnership Project (3GPP) channel models [27][28]. The effect of power control in the uplink and cell range expansion biasing in the downlink for strongest average BS association has been taken into account. The probabilities for marginal uplink, marginal downlink and symmetrical spectral efficiencies have also been obtained using adaptive modulation with realistic thresholds from an LTE simulator available in [29]. We have analyzed the joint downlink/uplink rate coverage of the same two-tier heterogeneous network formed by pico and macro cells within a unified framework. It is analyzed if decoupling benefits compensate its architecture complexity. The impact of user density and infrastructure sharing between macro and pico cells has been studied. The effect of fractional power control as well as signaling limits on the number of active users simultaneously active within a cell is analyzed under all association strategies. Distribution of throughput which could be reached simultaneously by both communication directions is analyzed. Besides evaluating average values, we also address the effects of association criteria, power control, and biasing on fairness in the joint DL/UL throughput sharing among users. The impact of open loop user transmission power ( $P_u$ ) on spectral efficiency, joint rate, and fairness has also been analyzed. Finally the impact of user density, users' limit, BSs macro/picocell

densities, and range extension biasing on the Energy Efficiency (EE) has been studied.

## 1.2 Contributions of the dissertation

The contributions of this dissertation are given as follows:

- The transmission success probability (TSP) as the probability of both uplink/downlink SINR being greater than the certain threshold  $x$  has been obtained and independence assumption between marginal SINRs is explored in section 5.2.1.
- Symmetrical spectral efficiencies have been obtained using adaptive modulation with realistic thresholds from an LTE link simulator model parameters. Better symmetric spectral efficiency is obtained under average association compared to minimum distance and minimum path loss cases. This has been evaluated in section 5.2.2.
- The joint uplink and downlink data rate or symmetrical binary rate that can be achieved by realistic spectral efficiencies as signaled by channel quality indicators in LTE has been studied in section 5.2.3.
- The effect of maximum number of users and resource sharing is analyzed in section 5.3.1.
- Besides symmetric spectral efficiency and binary rate, fairness and energy efficiency have been evaluated as the function of diverse system parameters under various coupling and association criteria using realistic 3GPP path loss models. These results are covered in sections 5.3.1 through 5.3.3.

## 1.3 Outline of the dissertation

Rest of the thesis is outlined as follows:

Our chapter 2 provides an overview of Heterogeneous Cellular Networks (HCNs). First, we describe the different types of small cells to form a heterogeneous network, and then we look into key aspects and challenges faced by HCNs. We also discuss some of the leading technologies, providing a road towards development of fifth generation (5G) cellular networks. Finally, we discuss the Poisson Point Processes (PPP) and their importance in analyzing the heterogeneous cellular networks.

In chapter 3, keeping in view the accuracy and tractability of PPP network models, we present a stochastic geometry based two-tier cellular network where tier-1 and tier-2 are formed by macro and pico BSs respectively. We also discuss user association criteria for downlink and uplink which include nearest BS and strongest BS associations for the DL and minimum path loss association for the UL transmission. Moreover, two techniques used in HCNs known as Cell Range Expansion and Fractional Power Control are discussed.

In chapter 4, we describe various system performance indicators of heterogeneous cellular networks.

chapter 5 explains the achieved numerical results of main performance indicators under default system parameters' settings and effect of each of those parameters on system performance.

Finally, chapter 6 provides a summary of the work and concluding remarks along with the future research directions.

## 1.4 Related publications

- M. M. Shaikh, M. C. Aguayo-Torres, "Joint Uplink/Downlink Coverage and Spectral Efficiency in Heterogeneous Cellular Network," Springer Wireless

Personal Communications, November 2016, DOI: 10.1007/s11277-016-3889-1.

- M. M. Shaikh, M. C. Aguayo-Torres, "Fairness and Rate Coverage of Symmetric Transmission over Heterogeneous Cellular Networks under Diverse Coupling and Association Criteria," Springer Wireless Personal Communications, May 2017, DOI: 10.1007/s11277-017-4418-6.

## Chapter 2

# Overview of Heterogeneous Cellular Networks and Poisson Point Processes

### 2.1 Introduction

Wireless data traffic demands are growing tremendously due to mobile applications like social media, video contents, and cloud based contents which are necessary part of people's daily life today. We also require these applications to be seamless, fast, stable, and economical. To cater the mobile broadband demands of a society, which has entered an era of Big Data, is only possible with an ample capacity and coverage. This forced the network operators to rethink about the improvement of their networks under the principle of higher capacity and better coverage at reduced cost and energy consumption [1]. Higher capacity and better coverage can be obtained by adding the more spectrum and by increasing the network density. However, the spectrum is limited and costly, and consequently the only solution to maintain the user experience with continuous increase in traffic, seems to be the network densification. Thus, the

higher capacity on the legacy networks can be achieved by the deployment of small cells in those macro coverage areas where the huge traffic demand arises. The small cells are equipped with the low power nodes which could be the indoor femtocell or an outdoor picocell and besides the capacity, the deployment of small cells also addresses the issue of cost and energy [1]. Hence the solution of the data traffic demand emerged in a migration of homogeneous network to a heterogeneous network architecture, which has been adopted by many wireless network operators today globally.

## 2.2 Heterogeneous cellular networks

Macrocell network alone cannot achieve the required capacity and coverage specifically in the indoor or outdoor high traffic density areas like city centers, airports and shopping malls, etc. Thus, the small cell network with low power base stations play an important role in achieving the future coverage and capacity when combined with the existing macrocell network. Such a network is called the Heterogeneous Cellular Network (HCN). Different kinds of heterogeneous networks can be developed by adding different types of small cells to the macrocell network according to the required capacity, coverage, and need of the customers. Along with other benefits of adding small cells, the site acquisition for their base stations is quite easy and cheap. The small cells utilize different types of base stations also called as low power nodes, which have different dimensions, power utilization, radio propagation characteristics, and coverage etc., depending upon the situation. The different types of small cells along with their different kinds of low power nodes are discussed in the following subsections.



### 2.2.1 Distributed antenna systems

Distributed Antenna System (DAS) is a collection of nodes connected to a centralized base band transceiver unit via fiber optic cable to provide cellular network coverage in areas of weak or no signal. The DAS nodes contain the Remote Radio Head (RRH) with antenna. Besides the different DAS configurations, one configuration is RF to optical to RF. In this configuration, the RF signal received by the centralized base band unit is converted into optical signal and fed to the nodes which convert optical signal back into RF signal. DAS system can be implemented with various frequency bands and technologies. DAS can be deployed indoor as well as outdoor. Usually DAS is implemented to improve coverage in an areas like underground stations, hospitals, universities, airports, convention centers, stadium, casinos and in other similar places.

### 2.2.2 Microcells

These are small cells in a cellular network environment having lesser coverage than the macrocell network. The coverage range of microcells is less than 2 kilometers. Microcells are served by the micro base stations which are normal base stations but with lower transmit power of 5-10 W than the macro base stations and can coordinate with the macro network via X2 interface in Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) [2]. The micro base stations are used for hotspot coverage and are deployed outdoors.

### 2.2.3 Picocells

Picocells are also small cells, used in the mobile network for better coverage in the areas with huge traffic. Picocell base stations are also similar to macrocell and microcell base stations but unlike in perspective of power and range. They have small power, typically 250 mW to 2 W approximately and low range of about 200 meters

in comparison to macrocell and microcell base stations. Picocells can be deployed indoors and outdoors. They also coordinate with macrocell network via X2 interface in E-UTRAN.

### 2.2.4 Femtocells

Femtoells are very low power indoor consumer deployed base stations. The femtocells are not open access like the microcells and picocells but they are only accessed by subscribed group and forms a Closed Subscriber Group (CSG). They are also called as Femto Access Points (FAP) and their typical transmit power is 100 mW. In LTE, FAPs are called as Home Evolved NodeB (HeNB) and in Universal Mobile Telecommunication System (UMTS), they are known as Home NodeB (HNB).

DAS supports multiple technologies like High Speed Packet Access (HSPA) and LTE whereas microcells, picocells and femtocells only support one technology. Microcells and picocells use the standardized backhaul for coordination purpose with the macro base station but femtocells backhaul facility is provided by the network operator through consumer's own connection. Some times the Relay Nodes (RNs) are used for the coordination purpose where wired backhaul is not possible. RNs can be deployed indoors and outdoors with their typical power range of 250 mW to 2 W and 100 mW for outdoor and indoor deployments respectively [8]. Three types of links are available in this type of network. The first type of link is called backhaul link where donor eNodeB (eNB) and RN are connected via Un radio interface. Second type of link is between the RN and User Terminal (UE) via Uu interface and is known as access link. The third link is possible between eNB and user via same Uu interface which is called direct link. If the backhaul link and access link use same frequency, the relay is an in-band relay otherwise it is an out-band relay.

## 2.3 Key aspects and challenges of heterogeneous cellular networks

There are many aspects which distinguish the heterogeneous cellular network from the homogeneous mobile network. It is intuitive that heterogeneous cellular network has better coverage and capacity than the legacy networks but on the other hand, by adding the small cells, many challenges are faced by the network designers. Some of key aspects and challenges are discussed in this section.

### 2.3.1 Cell association and load balancing

In heterogeneous cellular networks, the user or a UE is associated to a specific base station depending upon a specific rule which is called an association criteria. Different base station selection criteria like nearest BS selection, maximum average receive power, and minimum shadowed path have been considered under coupling and decoupling of the downlink and uplink. Load balancing is performed in heterogeneous networks by offloading UEs from loaded macrocells to lightly loaded small cells. In downlink, mostly the maximum average receive power association criteria is used and biasing is required to offload UEs from macrocell to small cell as the power of macrocell is always higher than the small cells. Load balancing improves the data rate of the small cell associated users and provides more resources for the remaining users associated with macrocell. High speed users are always associated to macrocell to avoid frequent handoffs.

### 2.3.2 Small cell densification and intercell interference

Intercell interference is another challenge faced by the heterogeneous cellular networks when the network is deployed with large number of low power nodes. Numerous frequency and time domain techniques have been developed to mitigate the intercell

interference. These techniques have been proposed in various LTE Releases. This interference can be minimized through the time/frequency domain techniques such as Enhanced Inter-cell Interference coordination (eICIC), Further Enhanced Inter-cell Interference coordination (feICIC), and Carrier based Inter-cell Interference coordination.

In time domain eICIC technique, macro BS fix some time intervals during which its transmit power is almost zero and UEs connected to picocells face with very reduced interference. The fixed time intervals for almost zero or reduced transmit power for macro BSs are known as Almost Blank Subframes (ABS) in LTE. In eICIC the transmit power of macro BSs is almost zero whereas in feICIC, it is reduced but not almost zero during muted subframes. In frequency domain techniques, one form of mitigating interference is that the macro BSs inform pico BSs via X2 interface for more frequently used frequency bands and pico BSs try to avoid those announced frequency bands by macro BSs and utilize other spectrum for its UEs to reduce interference. Other technique introduced by 3GPP in frequency domain is known as Carrier Aggregation (CA) based eICIC. In this technique, macro and pico BSs are assigned different Carrier Components (CC) to alleviate interference.

Other technologies such as Coordinated Multipoint transmission and reception (CoMP) can be employed to alleviate intercell interference by the cooperation of the macrocell and small cell.

#### 2.3.3 Self-organizing networks

Another challenge which occurs with the densification of cellular networks with low power base stations is configuring the parameters of the base stations. In small macrocell network, the base station parameters were configured manually which is not possible in a dense heterogeneous network. Hence, there is a substantial requirement in HCNs where nodes should self organize to facilitate the network

operation and maintenance. The term Self-Organizing Networks (SON) includes the group of functionalities of the base stations which enable themselves to organize in order to simplify the network operation and maintenance. The three broad categories of SON functionalities are self-configuration, self-optimization and self-healing. SON also includes aspects for controlling interference.

### **2.3.4 Handover**

In HCN, different types of small cells are used which create problems if same rules of handover like in homogeneous network are applied for handover. It is required to have different handover offset according to different types of small cells deployed in HCN to address handover issue. Moreover, in highly dense HCNs, high speed UEs are associated to macrocell to avoid frequent handover between small cells. Thus, with efficient mobility management, handover issues in HCN can be minimized.

### **2.3.5 Energy efficiency**

With the addition of large number of small cells, UEs come closer to the network infrastructure and prolong the battery life. On the other hand, the overall carbon footprint of the network increases. To address this issue, the nodes should consume minimal power in an idle mode and efficiently when active. Besides this, there is also a need of new mechanisms, protocols and energy harvesting techniques to produce energy efficient or green heterogeneous cellular networks.

## **2.4 Future heterogeneous cellular networks**

Huge amount of research is on going to shape the today's fourth generation (4G) cellular networks into coming fifth generation (5G) cellular networks. Various technology developments for next generation 5G may be the part of future LTE

standards. Some of the key technologies providing a road towards 5G are discussed below.

### 2.4.1 Cloud RAN

In traditional cellular networks, all base stations are individually deployed with their own resources for backhaul, battery backup, cooling, security etc. This architecture has some limitations such as the cost of each base station, more interference coordination required for dense networks, and waste of resources due to traffic fluctuation because of the mobility of UEs on each base station. Keeping in view these limitations, a Cloud Radio Access Network (C-RAN) or some times called centralized RAN architecture was introduced. C-RAN comprises of the network of Remote Radio Heads (RRHs) distributed into the operational area and are connected to centralized Baseband Unit (BBU) via a low latency backhaul like fiber. C-RAN is similar to the DAS discussed earlier in section 2.2.1 but the differences lie in the operational area and scope. The combination of C-RAN and today's HCN may open a new area of research.

### 2.4.2 Millimeter wave communications and massive MIMO

Large amount of idle spectrum exists in the mmWave range of 30-300 GHz and several GHz spectrum available in 20-30 GHz range [30]. However, in mmWave spectrum, capacity is increased but coverage would reduce due to high path loss, leading towards the use of only small base stations. Besides the path loss, other propagation issues like blocking, atmospheric and rain absorption and association of UEs and base stations under narrow beam utilization are under research. Massive MIMO is a key solution to address some of the issues related to mmWave communications. In massive MIMO, large number of antennas are employed which improve spectral efficiency, reduce

interference due to narrow beaming towards targeted UE and provide the favourable propagation environment to reduce path loss. Although several issues like channel estimation for large amount of transmit antennas, pilot contamination and others regarding the massive MIMO are under investigation.

### 2.4.3 Big Data analytics

Dense deployment of small cells in HCN brings about huge volume of the data and it is quite difficult for network operators to optimize their networks without robust algorithms. Hence Big Data analytics may be a useful tool and an interesting area of research for telecommunication engineers to analyze the future heterogeneous cellular networks.

## 2.5 Poisson point processes

The fundamental element of geometry is a point. During investigation of the nature, we find many randomly and spatially distributed point patterns. This random collection of points in some space is called a point process. The study of these random spatial patterns is called stochastic geometry. In many fields of studies like forestry, epidemiology, geography etc, stochastic geometry plays an important role in the mathematical analysis. Similarly, in the field of wireless communication, stochastic geometry has got attention as the location of nodes and/or users can be considered as random points. One of the basic, simplest, and most important model for complete spatial randomness is Poisson Point Process (PPP). When the number of points distributed in a volume follows a Poisson law depending only on its volume and a parameter fixed along the whole space, the process is called homogeneous Poisson point process. Each point pattern generated by the point process is called a realization [4]. Fig. 2.1 shows a realization of Poisson point process with intensity

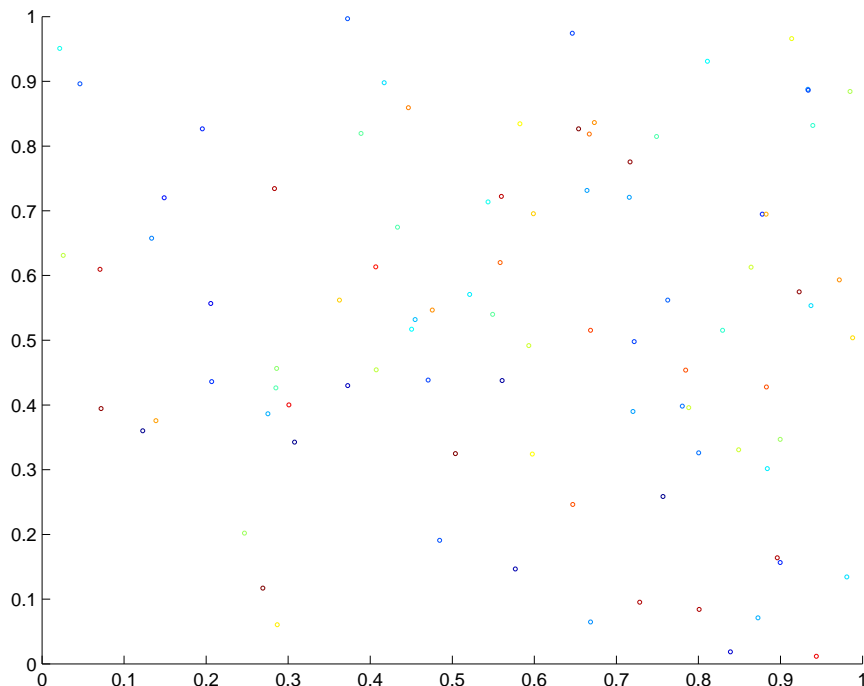


Figure 2.1: Realization of a Poisson point process with  $\lambda = 100$

( $\lambda$ ) of 100. If the points in Fig. 2.1 are considered to be locations of different types of base stations in an area of 1 Km<sup>2</sup> in a dense heterogeneous cellular network, their pattern is not deterministic. Thus, stochastic models such as Poisson point process are necessary to model such complex networks.

In cellular communication networks and other wireless networks, to expand the coverage and capacity for improving the user experience, different types of small cells like microcells, picocells or relays have been deployed. This has not only transformed the networks into dense networks but also made them difficult and complex to analyze. These new types of networks require new methods to analyze them as traditional methods of communication theory are inadequate because of the following reasons. (i) Instead of Signal-to-Noise Ratio (SNR), Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR) is a performance limiting factor. (ii) Path loss and fading are functions of the network geometry and interference depends upon these functions. (iii) In



large wireless networks, it is impossible for each node to anticipate the locations and channels of all other nodes [17].

Stochastic geometry plays an important role to overcome these difficulties. Stochastic geometry is a tool to analyze the average behavior of the network over many spatial realizations where the nodes are distributed, following some probability distribution [17]. In the following, we will use this tool to evaluate heterogeneous network performance.



# Chapter 3

## System Model and Association Criteria

### 3.1 Introduction

Wireless industry has developed many applications to facilitate the human communication. In some applications such as voice, social networking, or video-calls, originated traffic is symmetric and same minimum quality is maintained on both sides of the communications to keep the exchange. Cloud storage is an uplink intensive application where as in some prominent applications like video streaming, downlink traffic is extremely high compared to uplink transmission. However, even in these cases, a minimum throughput is needed in the uplink for signaling purposes (e.g., acknowledgments and quality measures). The user may fail to acquire required Quality of Service (QoS) from the network when it is only able to decode the transmission in downlink and unable to connect via uplink.

The legacy voice-oriented cellular networks have been evolved to modern networks called as Heterogeneous Cellular Networks (HCN) which consist of huge amount of small cells (micro, pico or femtocells) along with large (macro) cells. Due to different

cell size targets, transmission power disparity across different tiers is large. Analysis of HCNs is complex although some tools such as stochastic geometry came to help researchers in this task.

Several criteria can be used to associate User Equipment (UE) to a macro or a pico Base Station (BS). In current networks, only coupled associations are possible, wherein the UE is paired to the same BS for both uplink and downlink transmission. In homogeneous networks, formed by a single tier and where all BSs transmit with the same power, the association criteria as that BS from which average received power at the downlink is maximum is also that of maximum received power at the uplink as DL and UL channels are nearly reciprocal in terms of shadowing and path loss. However, uplink coverage would be higher in a heterogeneous network if BS to be associated were selected independently, as the homogeneity of transmitters (i.e., UEs) is still kept [5]. Uplink and downlink decoupling is possible when certain issues are solved and this possibility is becoming viable for the development of 5G and the Cloud Radio Access Network (C-RAN) [6].

Fractional Power Control (FPC) and Cell Range Expansion (CRE) are the two techniques widely employed in heterogeneous cellular networks to enhance their performance. The Fractional Power Control (FPC) technique is usually employed to partially compensate the path loss due to distance between the UE and BS. Since the association strategy has a bearing on the statistics of distance, FPC is influenced by the association criteria. Cell Range Expansion (CRE) is another technique to offload macro BS traffic by increasing the small cell DL power measure. By increasing the coverage of small cells with the addition of the bias, the offloaded UEs come closer to their associated BSs. This way, CRE improves the uplink SINR for coupled associations.

In this chapter, we will describe the system model along with its deployment scenario and channel model. Other described topics include cell range expansion,

user association criteria in uplink and downlink, and fractional power control.

## 3.2 System model

A co-channel deployment of a two-tier heterogeneous cellular network is shown in Fig. 3.1. Tier-1 comprises of the macro BSs with fixed transmit power of  $P_1$  and tier-2 is formed by pico BSs with fixed transmit power of  $P_2$ . Pico BSs transmit power  $P_2$  is considered to be lower than  $P_1$ . Base station locations are modeled by independent homogeneous Poisson point processes denoted by  $\Phi_k$  with intensity  $\lambda_k$ , where  $k = 1$  stands for macro BSs and  $k = 2$  stands for pico BSs. Generally one can obtain a higher number of tiers easily. As per superposition theorem of the Poisson point process, when two independent homogeneous Poisson point processes are superimposed, the overall point process generated is also a Poisson Point Process (PPP). In this model, we have two tiers of macro and pico BSs, modeled as points of independent homogeneous PPPs with intensity of  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$  respectively. Hence overall generated process as per superposition theorem is also a homogeneous PPP with  $\Phi_{BS} = \Phi_1 \cup \Phi_2$  with intensity  $\lambda_{BS} = \lambda_1 + \lambda_2$ . We denote the ratio of pico BS as compared to the macro BS as  $\beta$ , that is,  $\beta = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ . All BSs within a tier transmit with the same constant power  $P_k$ .

Users are modeled by another independent homogeneous PPP  $\Phi_u$  with intensity  $\lambda_u$ . We denote the ratio of user density as compared to the total BS density as  $\gamma$ , that is,  $\gamma = \frac{\lambda_u}{\lambda_{BS}}$ . All the User Equipments (UEs) have transmit power  $P_u$  which might be modified by Fractional Power Control (FPC) to partially compensate path losses to the BSs they are associated to.

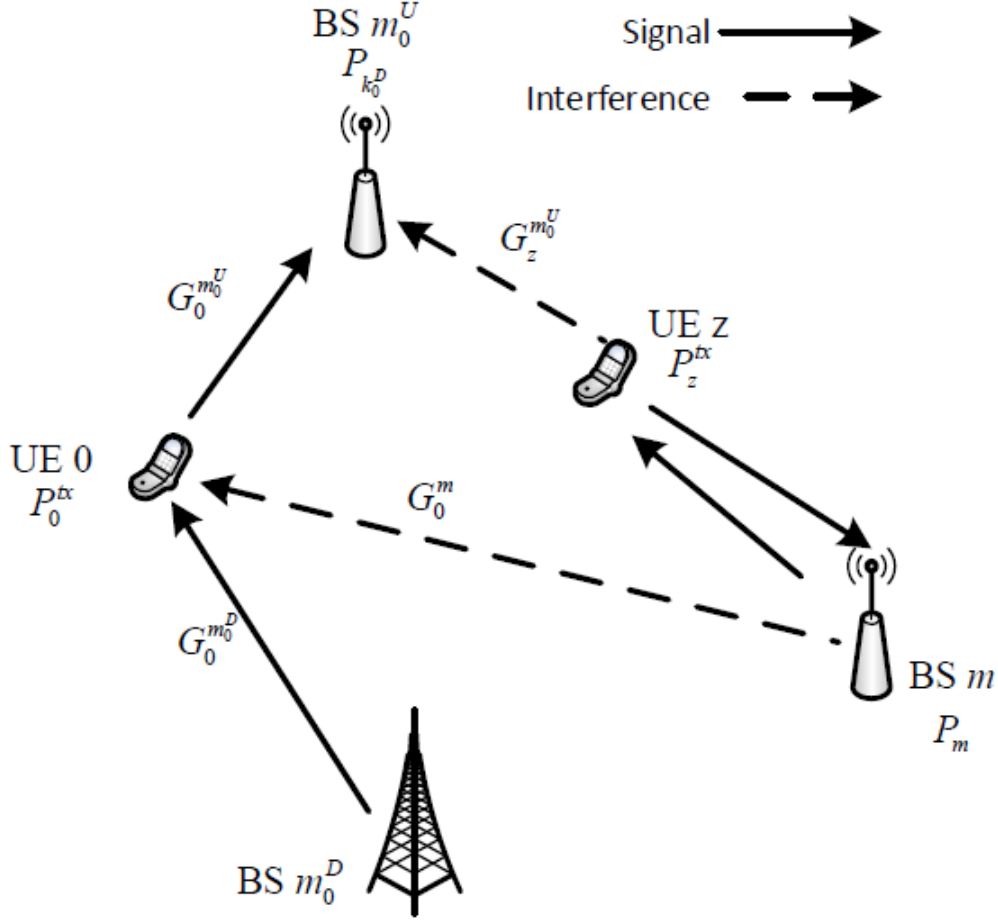


Figure 3.1: System model showing decoupled association for user 0. Interference signals by transmissions to/from user  $z$  are also shown.

### 3.2.1 Channel model

The path loss between a UE  $z$  and a certain BS  $m$  within tier- $k$ , located at a distance  $d_z^m$  from it, with the proper constants can be written as

$$\frac{1}{K_k} (d_z^m)^{\alpha_k}, \quad (3.2.1)$$

where  $K_k$  is the path loss slope and  $\alpha_k$  is the path loss exponent. Further, large scale fading has also been considered, and thus the shadowed channel losses between a UE

$z$  and a BS  $m$  is given by

$$L_z^m = \frac{1}{S_z^m} \frac{1}{K_k} (d_z^m)^{\alpha_k}, \quad (3.2.2)$$

where  $S_z^m$  is the random realization of the log-normal shadowing between the user and the BS. Log-normal shadowing average, denoted by  $\sigma_k$ , is different for each tier. In this work, we have considered the 3GPP channel model [27]. Different path loss slopes and exponents as well as shadowing averages for each tier have been taken into account. Regarding the uplink, path losses and shadowing have been considered symmetric to those of the downlink.

Small scale fading is assumed to be independently and identically Rayleigh distributed across all links in the system. The fade attenuation on any link  $l$  (DL or UL) between any BS  $m$  and UE  $z$  is then considered to be exponentially distributed with unit mean, i.e.,  $H_{z,m}^l \sim \exp(1)$ . Instantaneously, the received power is faded and the channel gain between the UE  $z$  and the BS  $m$  in the link  $l$  is given by

$$H_{z,m}^l G_z^m, \quad G_z^m = S_z^m K_k (d_z^m)^{-\alpha_k} \quad (3.2.3)$$

For the decoupled association, user  $z$  receives the intended signal from its downlink associated BS  $m_z^D$  belonging to tier  $k_z^D$  and sends the information in the uplink to a possibly different associated BS  $m_z^U$  in tier  $k_z^U$ .

The description of BS selection for each user in both links (DL and UL) is given in following sections. Before describing about the BS selection criteria, we first discuss an important technique known as Cell Range Expansion (CRE) which is related to association criteria.

### 3.3 Cell range expansion

Association criteria have an impact on the distribution of the users among the BSs. In literature, the number of users associated to a BS is termed as

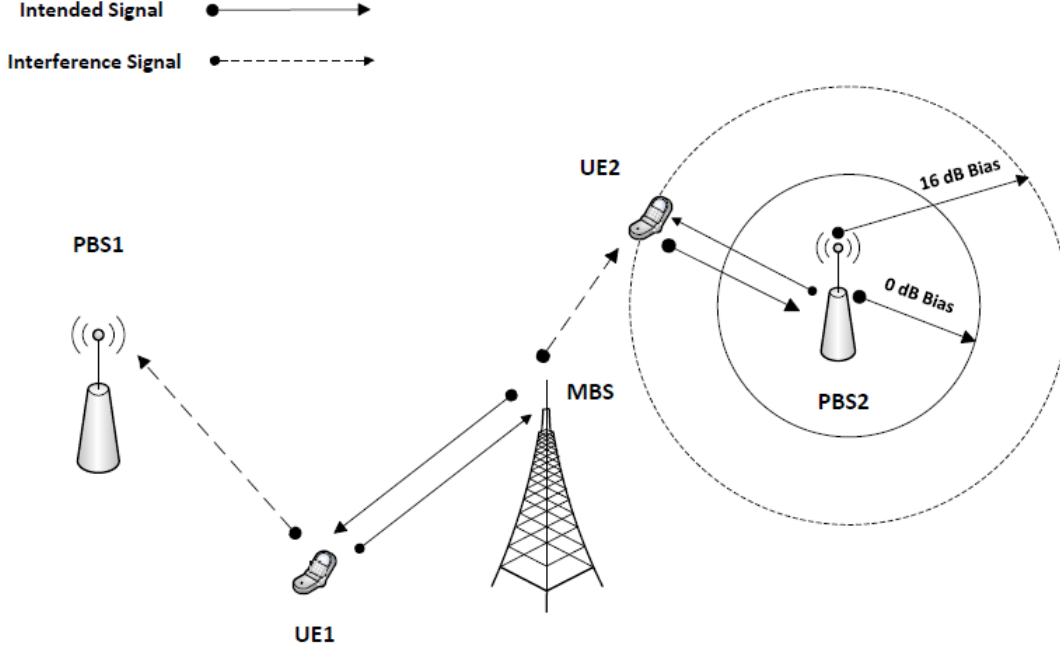


Figure 3.2: Cell range expansion concept.

load [6][10][11][19][24][25]. In homogeneous cellular networks, all BSs have an equal transmit power and somehow a regular pattern. Thus, almost equal number of users are associated to each BS and usually load is balanced across all BSs of the network. However, in heterogeneous cellular networks, e.g., deployments formed by macro- and pico-cells, the pattern of the BSs is usually random and pico BSs transmit with low power as compared to macro BSs. Due to this different transmission power at each tier, the usual association criteria of maximum average received power at the downlink would result in more users associated to macro than to pico base stations, that is, small number of UEs are served by pico cells. For load balancing purpose, a bias ( $\tau$ ) is added to the power received from the small cell BSs when an association criteria based on downlink received power is applied. This way of improving the coverage area of small cells and offloading traffic from macro to pico or generally to small cell BSs is known as Cell Range Expansion (CRE).



The concept of CRE is shown in Fig. 3.2. Initially, with CRE bias  $\tau = 1$  (0 dB), UE 2 is connected to macro BS in downlink. If added a CRE bias of a specific value, for example 16 dB as shown in Fig. 3.2, handover decision is taken by macro BS as a part of its handover procedure and UE 2 is served by pico BS (PBS2). The region between the 0 dB bias and specific applied logical bias (16 dB in this example) is called the CRE region. Besides other reasons (such as backhaul limits), CRE yields gain in throughput due to signaling reasons, since there exists a maximum number of users simultaneously served by a BS (30 in LTE for 10 MHz bandwidth) [28]. The probability of a user to be forced to keep inactive (i.e., no transmission allowed) even if it is not in outage, as there is no chance to assign signal resources to him/her, will be lower with appropriate biasing. Moreover, it is clear that the more users associated to a specific BS, the lower percentage of resources available to each one. Thus, the positive impact of utilizing the concept of range extension is the load balancing for the purpose of efficient distribution or utilization of resources. On the contrary, UEs located in the CRE region experience strong interference in downlink from the macro BSs. This is also shown in Fig. 3.2 with the dashed line. A higher value of CRE bias improves coverage of the small cells and more UEs are offloaded from macro to small BSs but it introduces considerable amount of interference in the downlink for them. Therefore, CRE degrades the downlink spectral efficiency for offloaded users. Interference can be minimized through time/frequency domain techniques such as enhanced Inter-Cell Interference Coordination (eICIC).

Regarding the uplink, transmission from UEs at the edge of macrocells will be received with low power at their associated macro-BS. The reason is that the difference of macro- and pico-cell power would result in much larger distances between UEs and associated macro BSs. This effect is mitigated through Fractional Power Control (FPC). Biasing UEs towards small cells improves the uplink received power for coupled associations as the offloaded UEs will probabilistically be closer to its

associated pico BS. As a consequence, edge UEs transmit less power as compared to unbiased association, reducing the interference level. Moreover, it increases the percentage of resources available for them. Fractional power control technique is described in section 3.6.

## 3.4 Downlink user association

Several association criteria have been successfully analyzed in literature such as led by maximum instantaneous received power [4], maximum biased average received power [19], and nearest BS [20]. Using these association rules, that BS associated to each user can be determined in the downlink. We have considered two serving BS selection criteria or association rules at downlink: to the nearest BS and to the strongest average BS. These are detailed in this section while further information on uplink association is given in the next section 3.5.

### 3.4.1 Nearest BS association

Nearest BS association determines the BS for the associating user which is geographically closest to it. In cellular communication, practically this association rule conform to the scenario where user is stationary comparable to the BSs.

Distances from an associating UE  $z \in \Phi_u$  to the whole set of BSs are written as  $\{d_z^m, m \in \Phi_{BS}\}$  and the subset of distances to BSs in tier  $k$  are written as being  $\{d_z^m, m \in \Phi_k\}$ . The BS to which the user  $z$  is associated in the downlink is named as  $m_z^D$  and by  $k_z^D$  the tier that BS belongs to. We will name as  $d_z^D = d_z^{m_z^D}$  to the distance from the UE  $z$  to its serving BS in the downlink.

As a first criteria, a mobile user is connected to its nearest BS, being the selected BS that accomplishing:

$$m_z^D(N) = \arg \min_{m \in \{\Phi_{BS}\}} \{d_z^m\} \quad (3.4.1)$$

This is equivalent to dividing the whole space  $R^2$  into Voronoi regions [4]. We call this criteria simply as “nearest”.

### 3.4.2 Strongest average BS association

In strongest or maximum average BS association criteria, a mobile user is connected to the BS from which the UE receives the maximum average power in the downlink. Fast fading does not have any bearing on this association as its effect is removed during the averaging of a large number of power measurements. In other words, this association criteria solely dependent on the path loss given by the eq. 3.2.1.

The maximum average receive power is also possibly biased in order to offload users from macro to pico BSs. Considering the same bias for all BSs in a tier, the candidate BS  $m_z^k$  at  $k$ -tier is the nearest BS within that tier from the UE:

$$m_z^k = \arg \min_{m \in \{\Phi_k\}} \{d_z^m\} \quad (3.4.2)$$

The selected BS under this criteria can be evaluated as that received with maximum average weighted power:

$$m_z^D(A) = \arg \max_{m_z^k, k \in \{1,2\}} \left\{ \tau_k \cdot P_k S_z^{m_z^k} K_k \left( d_z^{m_z^k} \right)^{-\alpha_k} \right\} \quad (3.4.3)$$

being  $k_z^D(A)$  the tier the selected BS under average power criteria belongs to. In this case, the associated BS is not necessarily the nearest BS from the UE but the whole space is divided in weighted Voronoi regions, whose size distribution depends basically on the ratio between the products of the transmission power  $P_k$  and the range expansion bias  $\tau_k$  ( $\tau_k \cdot P_k$ ). Along this work, weight for macro BSs is placed to unity  $\tau_1 = 1$  and bias for pico is simply named as  $\tau = \tau_2$ . We will refer to this criteria as “average”.

Please, note that for homogeneous networks this criteria is equivalent to the previous one based on distance.

In the following,  $d_z^D$  will name to the distance from a user  $z$  to its associated BS in the downlink,  $m_z^D$ . In both association models, the average power received by the user from its associated BS can be then written as

$$P_z^D = P_{k_z^D} S_z^{m_z^D} K_{k_z^D} (d_z^D)^{-\alpha_{k_z^D}} \quad (3.4.4)$$

Regarding the number of users associated to a certain BS, note that under these association criteria, it is possible that a BS has no allocated user in the DL, more likely happening for low user densities. In that case, resources are unused. On the other hand, the number of users associated to a specific BS is not upperbounded as, after conditioning to the cell size, it can be written as a Poisson distribution [4]. As described later, we will consider that at most  $N_{max}$  users are simultaneously served by the BS while the non-selected users (if any) are considered as inactive.

### 3.5 Uplink user association

In this work, both coupled and decoupled user associations have been considered. As per [6], five advantages of decoupling UL and DL have been discussed. The advantages discussed in [6] are: (i) increased uplink SINR and reduced interference; (ii) improved interference condition; (iii) improved data rate; (iv) load balancing in UL and DL; and (v) low deployment costs with RAN centralization. The large amount of advantages in better network throughput gains, coverage, and low power consumption due to decoupling are only possible with major architectural changes in current LTE-A mobile networks.

In all cases,  $d_z^U$  will name to the distance from a user  $z$  to its associated BS in the uplink,  $m_z^U$ . In the case of uplink coupled to downlink, an active uplink is scheduled to the same BS for each active user associated to a BS in the downlink, that is,  $m_z^U = m_z^D$ . In this case, the association criteria in DL greatly influences the UL

Table 3.1: Association summary.

No	Associated BSs (DL,UL)	DL association	UL association
C1)	$m_z^D(N) = m_z^U(N)$	Nearest	Nearest
C2)	$m_z^D(A) \rightarrow m_z^U(A)$	Average	Coupled
C3)	$m_z^D(A), m_z^U(M)$	Average	MPL

performance. In case of nearest association (C1), the associated BS in the DL is also the nearest one for the uplink. However, for maximum average received power (C2), coverage area for macro cells is greater (as  $P_1 > P_2$ ) and UEs tend to be farther from the serving BS.

If decoupled association is considered for the UL, BS is associated to an UL transmission under independent criteria. That would mean than  $m_z^U$  will be different from  $m_z^D$  with certain probability [21]. A single criteria have been evaluated for UL, that of minimum shadowed path loss. The candidate BS for each tier is the nearest BS within that tier from the UE, as in eq. 3.4.2, and the associated BS is that maximizing the channel gain:

$$m_z^U(M) = \arg \max_{m_z^k, k \in \{1,2\}} \left\{ S_z^{m_z^k} K_k \left( d_z^{m_z^k} \right)^{-\alpha_k} \right\}. \quad (3.5.1)$$

This “minimum path loss” (MPL) criteria is equivalent to maximize the average received power at BS if no power control would be considered for the UE. Note that the result will be likely different from that average criteria in the DL as different power is transmitted by each tier. Thus, even under the same constants  $\alpha_k$  and  $K_k$  for the channel losses, two different power values will be received at the same distance. This is not the case for the UL.

Table 3.1 is a summary of those associations studied in this work. For the first association criteria C1, BS as given by eq. 3.4.1 is the same in both links, uplink and downlink, that “nearest” BS. For the maximum weighted received power association in downlink (eq. 3.4.3), named as “average”, two different UL associations have been

studied. For that coupled, the BS associated in DL is also taken as BS associated in UL (association criteria C2). That is shown as an arrow “ $\rightarrow$ ” in the table. For that decoupled, association in the UL is independently decided as that of minimum shadowed path loss, given by eq. 3.5.1 (association criteria C3).

## 3.6 Fractional power control

As users located at the cell edges suffer more interference as well as lower intended signal, the achievable rate will be lower for them compared to that of users located near its associated BS. In an attempt to reach a more fair resource sharing, the use of Fractional Power Control (FPC) in the uplink partially compensates for path loss and large-scale fading (shadowing) from UE to BS at the expense of increased interference [12]. Additionally, a power constraint is especially important for both battery powering and safety limits [22].

As a consequence of FPC, power transmitted by the UE is highly variable and the interference power it produces not only depends on the distance to the interfered BS but also on the distance to its associated BS. Since the association strategy has a bearing on the statistics of distances towards the BS, FPC performance is influenced by it. Under Fractional Power Control (FPC), user equipment modifies the transmitted power to partially compensate path losses toward the associated BS in the uplink. Moreover, the existence of maximum power transmitted by the UE,  $P_{max}$ , has been taken into account.

Naming as  $\epsilon \in [0, 1]$  the power control factor, the power transmitted by the UE  $z$  is

$$P_z^{tx} = \min\{P_u (L_z^U)^\epsilon, P_{max}\}, \quad (3.6.1)$$

being  $P_u$  the UE open loop power, and  $L_z^U = L_z^{m_z^U}$  the path loss from the UE to its associated BS. It is clear from eq. 3.2.2 that the intended power received at its BS

has a term in the form  $(d_z^U)^{(1-\epsilon)\alpha_{kz}^U}$  which becomes unity for  $\epsilon = 1$ , that is, received power is fixed to  $P_u$ . On the other hand, interference produced in other BS  $m$  than intended (belonging to the  $k$ -tier) by user  $z$  will likely be increased as

$$I_z = P_z^{tx} (L_z^m)^{-1}. \quad (3.6.2)$$

In practical cellular systems such as LTE, fractional power control parameters are network-specific (and not user-specific). Adequate selection of  $\epsilon$  should provide acceptable performance for the majority of users while keeping a high overall system capacity.





## Chapter 4

# Various Performance Indicators of Heterogeneous Cellular Networks

### 4.1 Introduction

In old voice oriented network analysis, mostly the BSs are placed using the hexagonal geometric approach. These models are considered to be highly idealized and not tractable, and very complex system based simulations are required to evaluate system performance indicators like coverage/outage probability and rate [31]. The problem has been recently tackled by the researchers through a mathematical tool known as geometric probability or stochastic geometry and empirical as well as theoretical analysis supports its use [26]. One of the main purposes of heterogeneous wireless networks is to improve the user experience which experience worse channel conditions (typically, cell-edge users) and are more susceptible to interference than the users at the cell interior.

As previously described, we use coupled and decoupled association criteria for a UE to associate its BS and analyze the heterogeneous wireless network under two tier macro-pico deployment. We also implement the techniques such as Cell Range

Expansion (CRE) in downlink and Fractional Power Control (FPC) in uplink to evaluate the wireless system performance. Besides the CRE bias ( $\tau$ ) and FPC index ( $\epsilon$ ), we also analyze the effect of system parameters which include user to BS density ratio ( $\gamma$ ), maximum number of users' limit ( $N_{max}$ ), BS density ratio of pico to macro ( $\beta$ ), and open loop transmit power ( $P_u$ ) under all coupled and decoupled association criteria mentioned in chapter 3.

In this chapter, we discuss various performance metrics which are important indices to analyze the heterogeneous cellular networks. The most basic and important general metric in cellular networks is the coverage probability, which can easily lead to calculate other performance indicators. Analyzed indicators include average load of non empty BSs, spectral efficiency, binary transmission rate, energy efficiency, and fairness. Shannon bound as well as realistic Adaptive Modulation and Coding (AMC) have been employed to evaluate spectral efficiencies and throughput.

Fig. 3.1 shows a macro-pico deployment scenario. The number of users and macro and pico BSs are randomly obtained for certain realizations of the Poisson processes. In the figure, only two users, one macro BS and two pico BSs are shown. Association criteria are run for all UEs in the network as described in chapter 3. We randomly choose a specific UE from the PPP  $\Phi_{UE}$  to be analyzed and named it as user 0, being  $m_0^D$  the BS it is associated in DL and  $m_0^U$  that in UL. In the figure, decoupled association for DL and UL has been carried out, user  $w$  has selected BS  $m$  for both UL and DL while user 0 has associated to the macro BS  $m_0^D$  in downlink and to pico BS  $m_0^U$  in the uplink. Uplink transmission power is calculated for all UEs using eq. 3.6.1 as fractional power control has been employed.

We have considered orthogonal resource allocation in both uplink and downlink. Under that assumption, no interference comes from the BS to which the analyzed user is associated. Moreover, if a BS has more than one associated user, one of them is randomly selected as interferer. The set of interfering mobiles in the UL is named

$U$ , and that of interfering BS in the DL as  $D$ .

## 4.2 SINR coverage

The SINR coverage or simply the coverage probability is the probability that a typical UE achieves some threshold SINR. This is simply the Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF) of the random variable SINR, mathematically written as [3][4][31]:

$$P_c = P[\text{SINR} > T]. \quad (4.2.1)$$

In the downlink, the SINR can be written [4][31] as:

$$\text{SINR}^D = \frac{P_{k_0^D} G_0^{m_0^D} H_{0,m_0^D}^D}{N_0 + \sum_{m \in D} P_m G_0^m H_{0,m}^D}, \quad (4.2.2)$$

where  $G_0^m$  is the channel gain from the BS  $m$  towards the analyzed user 0 and  $H_{0,m}^D$  is the fading power in the downlink of the same path.  $m_0^D$  is the specific BS associated to user 0 in the DL, sending the intended signal to him with power denoted as  $P_{k_0^D}$ .

As for the uplink, the SINR for the same user is evaluated at the  $m_0^U$  BS, not necessarily the same BS from which the signal was received in DL ( $m_0^D$ ) if decoupled association is considered. That SINR can be written as [7][12][13][21]:

$$\text{SINR}^U = \frac{P_0^{tx} G_0^{m_0^U} H_{0,m_0^U}^U}{N_0 + \sum_{z \in U} P_z^{tx} G_z^{m_0^U} H_{z,m_0^U}^U} \quad (4.2.3)$$

with  $P_z^{tx}$  and  $P_0^{tx}$  the transmitted power after FPC by user  $z$  and 0, respectively, as given by eq. 3.6.1. All fading channels  $H_{0,m_0^D}^D$ ,  $H_{0,m}^D$ ,  $H_{0,m_0^U}^U$ , and  $H_{z,m_0^U}^U$  are assumed to be i.i.d. exponential variables.

Any transmission carried out on a cellular network is formed by both uplink and downlink transmissions. Sometimes, in some applications like video streaming, downlink traffic is extremely higher than the uplink transmission. However, due

to symmetric traffic applications like voice, social networking or video-calls, it is vital to analyze the joint performance of downlink and uplink transmissions as both should have quality enough to support the service. Also to get more insight into heterogeneous cellular networks, it would also be quite interesting to analyze the joint uplink and downlink distribution of SINR for the two tiers along with the marginal distributions. Therefore, along the evaluation of marginal downlink and uplink SINR coverage, we evaluate the Joint Complementary Cumulative Distribution Function (JCCDF) for both SINR at uplink and downlink, which is given by

$$F_{SINR^D, SINR^U}(x, y) = Prob[SINR^D > x, SINR^U > y]. \quad (4.2.4)$$

This allows studying the performance of both uplink and downlink as a whole. Marginal CCDFs for DL and UL,  $F_{SINR^D}(x)$  and  $F_{SINR^U}(y)$  can easily be obtained from JCCDF by taking  $y = 0$  and  $x = 0$ , respectively.

From previous expressions, it is clear that, although independence between UL and DL SINRs could be guessed if they are evaluated conditioned to the set of distances in the network, high correlation would exist between distance distributions. Thus, that probability cannot be assumed without discussion as the product of probabilities, i.e.,  $F_{SINR^D, SINR^U}(x, y) \neq F_{SINR^D}(x)F_{SINR^U}(y)$  (although some previous works did it [9]). Moreover, coupling between DL and UL creates stronger dependence, dismissed in previous bibliography [26]. In the next chapter, independence assumption will be checked.

We name Transmission Success Probability (TSP) as the probability of both uplink/downlink SINR being greater than the certain threshold  $x$ , i.e.,

$$TSP(x) = F_{SINR^D, SINR^U}(x, x) = Prob[SINR^D > x, SINR^U > x]. \quad (4.2.5)$$

### 4.3 Cell load

Each BS has certain resources to be shared among users associated to it. We denote as  $N^l$  the total number of users sharing the resources of the BS to which the intended user is associated in the uplink ( $l = U$ ) or downlink ( $l = D$ ), henceforth referred to as load. Load is of course another random variable like BSs and user position realization, and it is greatly influenced by association criteria. Theoretical results for average cell load sharing per tier  $\frac{N_k}{\sum_{j=1}^K N_j}$  under several association criteria can be found in literature [10][21]. Specifically, result for nearest criteria is simple: the average percentage of users associated to each tier is proportional to its density  $\frac{\lambda_k}{\lambda_{BS}}$ .

Using range expansion  $\tau > 1$  for pico cells would increase the percentage of users associated to that tier. Those users, however, will be farther from the pico BS and thus will have worse SINR. Of course, for coupled association criteria, both uplink and downlink loads are the same. Under decoupled criteria, the more dense pico tier is expected to give support to a wider set of users in the UL.

As previously described, we also took into account limits due to signaling. We have considered a maximum number of users  $N_{max}$  that can communicate simultaneously to/from a BS. If the number of users associated to a specific BS is greater than  $N_{max}$ , the set of active users are randomly selected within that group. The non-selected users (if any) are considered inactive and allocated no resources. We also evaluate the percentage of users which are inactive, that is,  $Pr(N^l > N_{max})$ .

For low user densities, it would also be possible that a certain BS is empty, that is, it has zero load.

### 4.4 Spectral efficiency

Spectral efficiency is defined as the information rate that can be transmitted over a given bandwidth in a communication system. It is a net bit rate of a communication

channel, upper bounded by the well known Shannon limit for the spectral efficiency:

$$\eta_s^l = \log_2(1 + \text{SINR}^l). \quad (4.4.1)$$

being  $l$  the analyzed link. Joint CCDF for spectral efficiency can be written as:

$$F_{\eta_s^D, \eta_s^U}(x, y) = \text{Prob} [\eta_s^D > x, \eta_s^U > y] \quad (4.4.2)$$

Marginal CCDFs for DL and UL spectral efficiencies can be obtained from it. For symmetric services, both up and down links should be able to carry enough throughput. We are then considering the random variable symmetric spectral efficiency  $\eta^{sym}$  whose CCDF is given by:

$$F_{\eta^{sym}}(x) = \text{Prob} [\eta^{sym} > x] = \text{Prob} [\eta^{DL} > x, \eta^{UL} > x] \quad (4.4.3)$$

Real systems such as LTE-A are not able to reach Shannon spectral efficiency but adaptive modulation and coding is used instead. In that case, system avoids exceeding certain target Block Error Rate (BLER) (e.g. 10%) by using more robust schemes when channel becomes worse while obtaining better throughput by increasing the number of bits per symbol of the scheme as channel improves. Although qualitative performance considering Shannon limit and Adaptive Modulation and Code (AMC) will be similar [32], AMC limits the maximum spectral efficiency (e.g., 8 bps/Hz for 256 QAM) and thus the achievable rate. Moreover, below a minimum SINR, users are kept in outage (no transmission) for AMC. Under AMC, only certain discrete values of spectral efficiency (lower than Shannon limits) are achievable. In order to perform it, the range of SINR is divided in to  $L$  fading regions  $\mathfrak{R}_i = \{\Psi_{i-1}, \Psi_i\}$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, L-1$  with  $\Psi_{-1} = 0$  and  $\Psi_{L-1} = \infty$ . Within the fading region  $\mathfrak{R}_i$ , a certain constellation/modulation scheme with  $M_i$  bits/symbol is employed. Below  $\Psi_0$  no transmission is issued and the UE is said to be in outage. Over  $\Psi_{L-2}$  no increase in SINR is able to improve the spectral efficiency.

The set of switching thresholds between constellations  $\{\Psi_i\}_{i=0,\dots,L-1}$  are to be designed to accomplish certain constraints and optimizing key performance indicators in the system [32]. We have considered along this work a maximum Block Error Rate (BLER) to be kept for all channel states. The AMC spectral efficiency can be written as a function of the SINR as:

$$\eta_{AMC}^l = \log_2(M_i), SINR^l \in [\Psi_{i-1}, \Psi_i]. \quad (4.4.4)$$

An expression equivalent to eq. 4.4.2 can be written for AMC spectral efficiency joint CCDF.

Following fading a Rayleigh distribution, the probability of a specific user being in outage can be easily evaluated as:

$$Out = Pr(SINR^l < \Psi_0) = 1 - \exp\left(-\frac{\Psi_0}{E[SINR^l]}\right) \quad (4.4.5)$$

with  $E[SINR^l]$  the average SINR for that specific user.

It is clear that association has an effect on the probability of user outage. Conditioned to certain position, associating a user to a certain BS will modify its average SINR and thus, the probability of faded SINR being below the minimum AMC threshold. It should be noted that path loss to macro and pico BSs are different, thus even if user is located at the same distance towards them, outage probability will be different. Moreover, the amount of interference will also influence the chances of a user for transmission. The percentage of users in outage is thus a direct measurement of the per-user-average SINR.

## 4.5 Binary rate

For the active set of users associated to a specific BS, we considered that bandwidth is shared equally among them (as accomplished by proportional fair or round robin

scheduling) and assumed infinitely divisible orthogonal bandwidth. This emulates the behavior of current cellular systems using Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) such as LTE for greater enough bandwidth and limited number of users. Moreover, it is assumed that all queues for downlink and uplink transmission are saturated, that is, each BS and UE always has data to transmit. Rate for the typical user is thus to be written as

$$R^l = \frac{W}{N^l} \eta^l, \quad (4.5.1)$$

where  $\eta^l$  is given in eq. 4.4.1,  $W$  is bandwidth (considered equal for DL and UL) and  $N^l$  is the cell load for the uplink ( $l = U$ ) or downlink ( $l = D$ ). Shannon limit or AMC spectral efficiency will result in different rates, being that of AMC more realistic.

In any wireless service, certain minimum transmission rate should be exceeded in both links in order to allow a minimum service performance:

$$F_{R^D, R^U}(x, y) = Prob [R^D > x, R^U > y]. \quad (4.5.2)$$

For symmetric services, both up and down links should be able to carry enough throughput. We are then considering the random variable symmetric rate  $R^{sym}$  whose CCDF, given by

$$F_{R^{sym}}(x) = Prob [R^{sym} > x] = Prob [R^D > x, R^U > x], \quad (4.5.3)$$

will be further named as Joint Rate Coverage. Marginal UL or DL Rate Coverage could be obtained from the Joint CCDF in eq. 4.5.2 by taking  $x = 0$  and  $y = 0$ , respectively.

Averaging the symmetric rate among users gives a measure for the overall system capacity for a typical user. It can be easily written from the CCDF of a positive random variable as

$$E[R^{sym}] = \int_0^\infty Prob [R^{sym} > x] dx \quad (4.5.4)$$



## 4.6 Energy efficiency

One main target in HCNs is to improve the energy efficiency by reducing the distance between UEs and BSs while not increasing the interference by deploying a large number of low-power small cells. Energy Efficiency (EE) is a performance index and quantitative parameter of utmost importance in heterogeneous cellular networks, able to measure the efficient use of available resources. [35][36][37][38] describe how the energy efficiency can be improved with the macro-pico cell deployment.

Energy efficiency can be defined in various ways. One way to define it as the spectral efficiency normalized by the power spectral density. Other way, it can be defined as channel capacity normalized by the system power consumption [33]. Most commonly, the efficiency of a communication link is defined as the ratio of total network data rate to the total network power consumption, where the unit is bits/Joule [34] or in other words, how much energy is needed to transmit a bit of information successfully. We define this variable as

$$EE^l = \frac{R^l}{P_0^l} \quad (4.6.1)$$

We name as  $P_0^U = P_0^{tx}$  that power transmitted by user 0 in the UL to obtain the uplink rate  $R^l$ . Regarding the power needed by the BS to which the user is associated,  $P_0^D$ , it can be written as the addition of the transmission power, i.e.,  $P_1$  or  $P_2$  depending on the tier, and the static power expenditure of the macro and pico BS. It is clearly stated that energy efficiency is a random variable whose average is not the ratio of the the average rate and the average power consumption due to the lack of independence.

## 4.7 Fairness

In order to evaluate fairness of the system, several figures of merit (e.g. Gini index or kurtosis) could be used. In this work, Jain's index is evaluated as an estimator of the

index of dispersion able to rate the fairness of a set of values while it is not unduly sensitive to atypical values. Jain's Fairness Index (JFI) is calculated as

$$\mathcal{J}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2}, \quad (4.7.1)$$

where there are  $n$  users and  $x_i$  is the rate for the  $i^{th}$  user. The result ranges from  $\frac{1}{n}$  (worst case) to 1 (best fairness), and it is maximum when all users receive the same rate. Moreover, it is  $\frac{k}{n}$  when  $k$  users equally share the resources, and the other  $n - k$  users receive zero allocation (i.e., they are inactive or in outage).

# Chapter 5

## Numerical Results

### 5.1 Introduction

Previous chapter described the wide set of indicators to be analyzed in this dissertation. In this chapter, we present our results obtained from simulations as a function of diverse system parameters. Except otherwise stated, simulation parameters are those summarized in Table 5.1. Specifically, we have used the 3GPP model [28] for channel simulation.

Most of work in literature regarding the HetNets address the analysis of the Signal to Interference and Noise Ratio (SINR) and this is a paramount parameter to find coverage probability. We start our discussion with this important measure of performance in HCNs. We study both marginal downlink and uplink coverage probabilities as well as joint coverage probability. We also discuss the impact of various system parameters on network performance under diverse coupling and association criteria. Performance indicators which have been obtained from simulations are summarized in Table 5.2. These simulation results ultimately provide the insights in the behaviour of heterogeneous cellular networks.

## 5.2. DISTRIBUTION OF MAIN PERFORMANCE INDICATORS FOR DEFAULT SYSTEM PARAMETERS

Table 5.1: System parameters, notation and default simulation values.

Parameter (Tier numbering: $k = 1$ macro, $k = 2$ pico)	Notation	Default value
User density factor	$\gamma = \lambda_u / \lambda_{BS}$	10
Ratio of pico and macro BS densities	$\beta = \lambda_2 / \lambda_1$	4
Cell range expansion bias	$\tau_1 = 1, \tau_2 = \tau$	0 dB
Maximum number of active users per BS	$N_{max}$	60
Open loop UL user transmission power	$P_u$	0 dBm
Fractional power control index	$\epsilon$	0
BS transmission power	$\{P_1, P_2\}$	$\{46, 24\}$ dBm
BS antenna gains	$\{G_1, G_2\}$	$\{15, 2\}$ dB
User antenna gain	$G_u$	0 dB
Max UL user transmission power	$P_{max}$	23 dBm
Path loss slopes	$\{K_1, K_2\}$	$\{128.1, 140.7\}$ (dB)
Path loss exponents	$\alpha_1, \alpha_2$	$\{3.76, 3.67\}$
Shadowing average	$\sigma_1, \sigma_2$	$\{10, 6\}$ (dB)
Noise spectral density	$N_0$	-174 dBm/Hz
Total BS density	$\lambda_{BS}$	0.24 (BS/Km <sup>2</sup> )
UL/DL Bandwidth	$W^U, W^D$	10 MHz

## Distribution of main performance indicators for default system parameters

### 5.2.1 SINR coverage

The marginal uplink/ downlink coverage probabilities  $F_{SINR^D}(x)$  and  $F_{SINR^U}(y)$  obtained from eq. 4.2.4 have been evaluated for the set of simulations parameters given in Table 5.1. Results for the association criteria C1, C2 and C3 as described in chapter 3 are shown in Fig. 5.1, Fig. 5.2, and Fig. 5.3, respectively. The comparison of marginal uplink coverage probability ( $P_c^U$ ) for the three association criteria is shown

Table 5.2: System performance indicator notation.

Performance indicator	Notation	Default measurement
Coverage Probability	$P_c^U, P_c^D$	Percentage
Active users associated to each tier	$A^M, A^P$	Percentage average
Cell load (for non empty BSs) per tier	$N^M, N^P$	Average
Inactive users per tier	$In^M, In^P$	Percentage
Users in outage	$Out^U, Out^D$	Percentage
Shannon spectral efficiency	$\eta_s^U, \eta_s^D$	Average
AMC spectral efficiency	$\eta_{AMC}^U, \eta_{AMC}^D$	Average
Shannon binary rate	$R_s^U, R_s^D$	Average, Jain's index
AMC binary rate	$R_{AMC}^U, R_{AMC}^D$	Average, Jain's index
Energy Efficiency for active users	$EE^U, EE^D$	Average

in Fig. 5.4. Uplink coverage results have been obtained with no fractional power control ( $\epsilon = 0$ ) as well as utilizing fractional power control index  $\epsilon = 0.5$  and full power control ( $\epsilon = 1$ ).

Note that in the CCDF plot, low values of  $T$  represent low SINR users. In a single tier regular network, they would be commonly located far from their serving BSs (cell edge users). On the other hand, users with high values of  $T$  would be statistically located close to their BSs (interior users), improving intended signal power while reducing interference from farther BSs. Heterogeneity of the network dramatically changes this behaviour.

It is found that under nearest association criteria (C1), mostly the users are camped to pico BSs as compared to macro BSs (80% with pico BSs and 20% with macro BSs) as seen in simulation results because of the higher density of pico BSs ( $\beta = 4$ ). In the downlink, as pico BSs have low power and are greatly interfered by BSs, in most cases SINR is lower than uplink. SINR in the uplink is much better compared to that in DL specifically for higher values of  $\epsilon$  i.e., at 0.5 and 1. The reason is that interferers are low power user equipments, while path losses

## 5.2. DISTRIBUTION OF MAIN PERFORMANCE INDICATORS FOR DEFAULT SYSTEM PARAMETERS

---

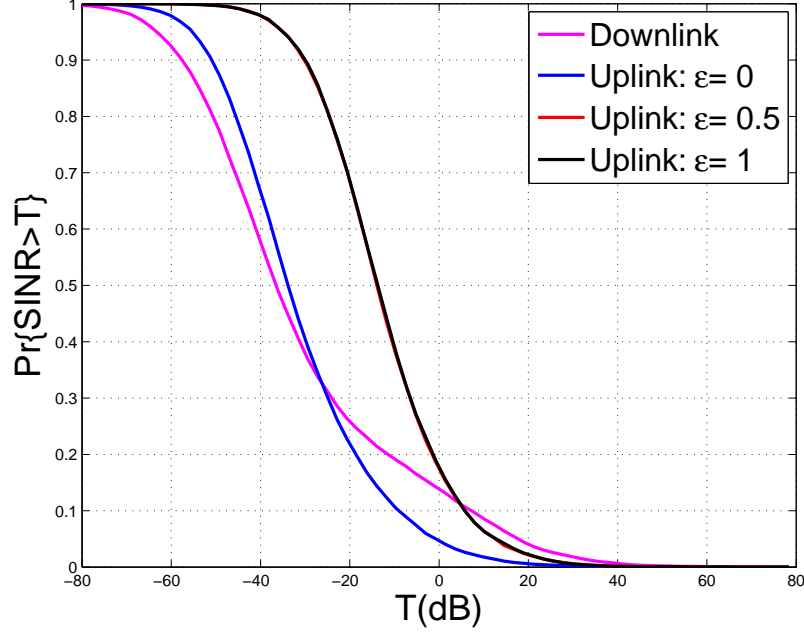


Figure 5.1: Marginal uplink and downlink coverage probabilities for association to the nearest BS (C1).

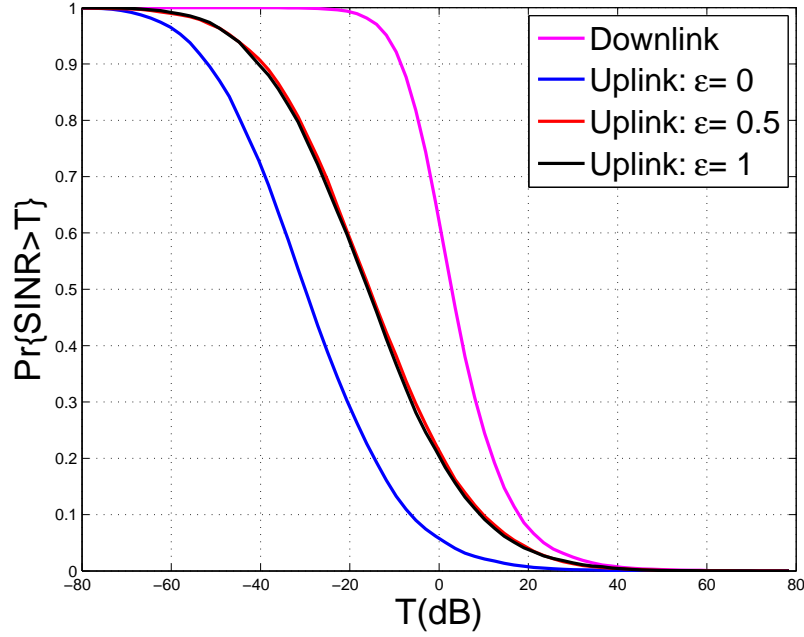


Figure 5.2: Marginal uplink and downlink coverage probabilities for average association case (C2).

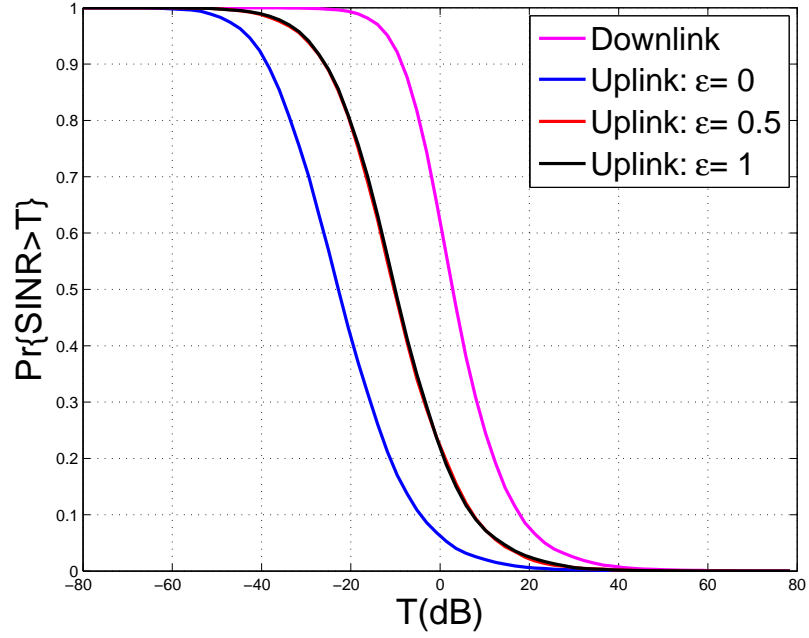


Figure 5.3: Marginal uplink and downlink coverage probabilities for average association in downlink and minimum path loss in uplink (C3).

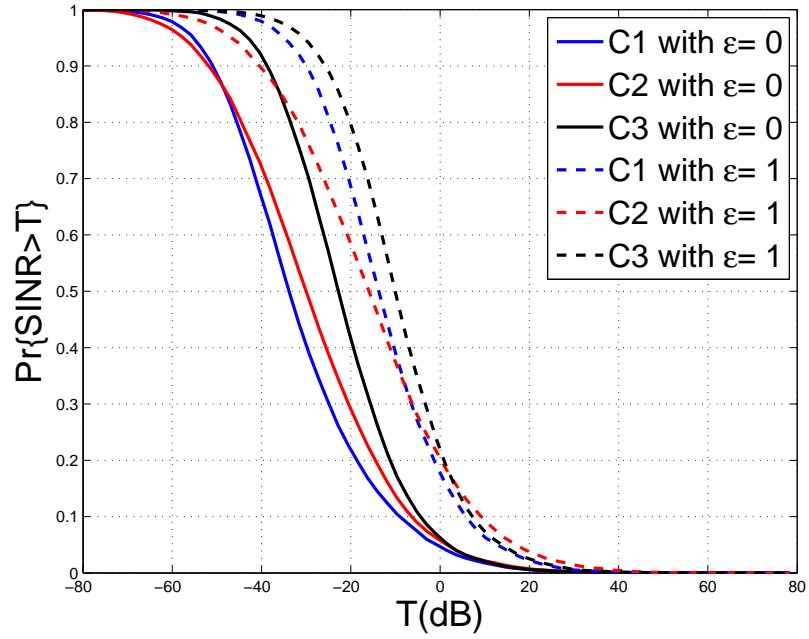


Figure 5.4: Comparison of marginal uplink coverage probabilities for C1, C2 and C3 cases under  $\epsilon = 0$  and 1.

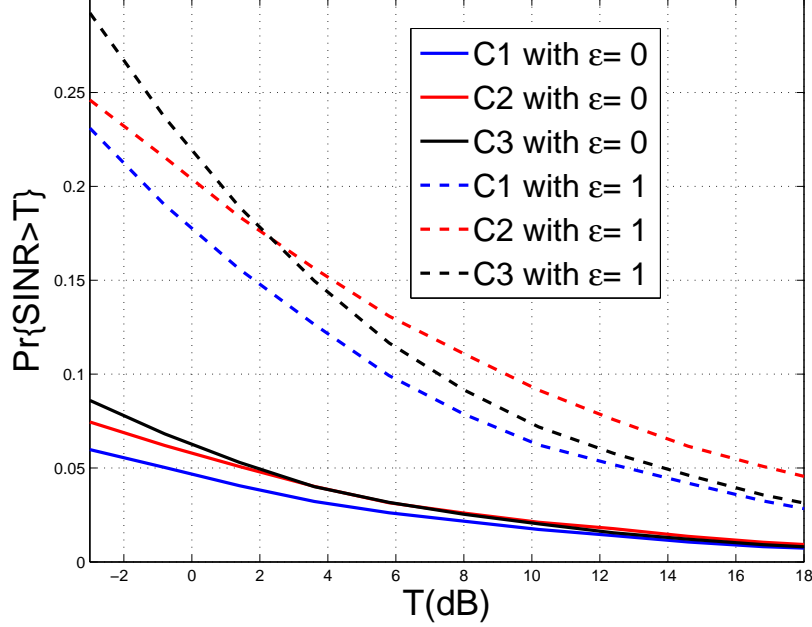


Figure 5.5: Enlarge view of comparison of marginal uplink coverage probabilities for C1, C2 and C3 cases under  $\epsilon = 0$  and 1.

for intended signal are low as their associated BSs are close to them. However, for larger values of  $T$  ( $-20dB$ ), users (cell interior users) improve their intended signal power in DL which consequently improves their DL coverage ( $P_c^D$ ) than UL coverage ( $P_c^U$ ) as shown in right part of Fig. 5.1. As a result, there exists a wide coverage disparity between uplink and downlink that has consequences on HCNs design and force researchers to find out the optimum value for the symmetric transmission under different system parameters and association criteria.

Regarding the average criteria C2, almost all (90%) users are associated to macro BSs due to their higher transmit power, also boosted by the difference in antenna gains of macro and pico BSs and only 1% are camped to pico BSs and rest of the users are inactive as shown in simulation results for default system parameters. As expected, downlink coverage probability ( $P_c^D$ ) is better than uplink coverage ( $P_c^U$ ) as shown in Fig. 5.2. In criteria C3, users are associated according to maximum average



received power in DL and minimum path loss in UL. Likewise in criteria C2, most of the users in criteria C3 are also camped to macro BSs (60% with macro BSs and 40% with pico BSs). In DL, UEs are connected to macro BSs for the same reason of higher power from macro BSs as in C2 but in UL they are linked to macro BSs for the different reason. The reason which forces most of users to associate with macro BSs rather than pico BSs in UL lies in difference of path loss slopes (K1 & K2 as shown in Table 5.1) between macro and pico BSs without considering antenna gains of macro and pico BSs. The path loss slope of macro BS is lower than that of pico BS because of antenna heights of two BSs. That is why majority of users expect minimum path loss from macro BSs rather than pico BSs. Inevitably  $P_c^D$  is better than  $P_c^U$  in C3 for the same reason as discussed under criteria C2 which is shown in Fig. 5.3.

We now compare the UL/DL coverage probabilities of C1, C2 and C3 cases. It is quite obvious from Fig. 5.1, Fig. 5.2 and Fig. 5.3 that  $P_c^D$  for C2 and C3 (which is same) is superior than C1 on the basis of rationale discussed above. However,  $P_c^U$  results for C1, C2 and C3 are compared in Fig. 5.4 for  $\epsilon = 0$  and 1. Generally high percent of users are associated to macro BSs under C2 and C3 criteria as macro path losses are lower than those to pico BSs. Thus, UEs in UL have better coverage under minimum path loss criteria C3 (often the same than under C2) than under C1. However, with  $\epsilon = 1$ , the intended power of UEs utilizing C1 criteria has improved much for which their coverage is higher up to the SINR threshold of approximately  $-5dB$  as compared to C2 case. It should also be noted that the SINR coverage under criteria C2 is improving than C1 and C3 after SINR thresholds of  $-5dB$  and  $2dB$  respectively with  $\epsilon = 1$  as shown in Fig. 5.4 and Fig. 5.5. The reason is that users with high SINR thresholds means they are close to their respective BSs and under criteria C2, users are close to their macro BSs where they have lower path losses along with higher macro BS antenna gain ( $15dB$ ). On the contrary, only 20% and 60% users are associated to macro BSs under C1 and C3 criteria respectively as already mentioned

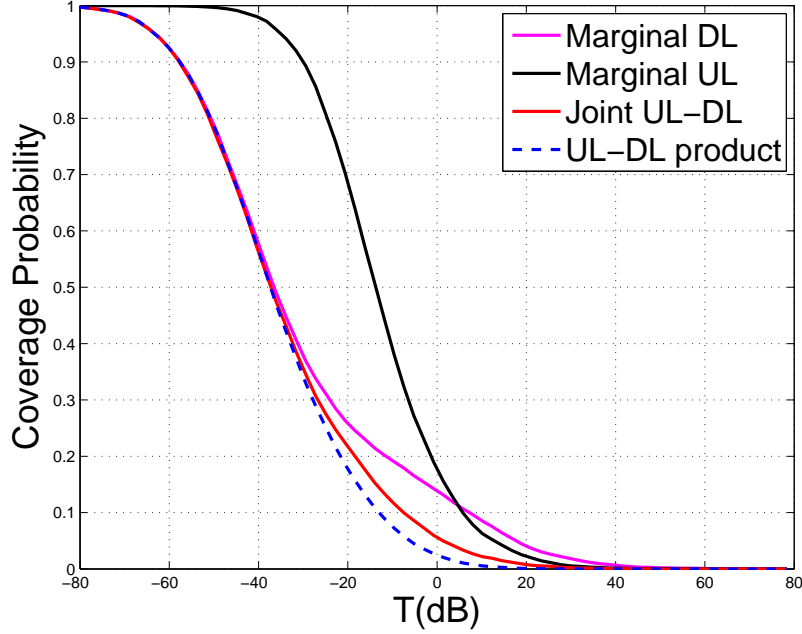


Figure 5.6: Marginal uplink, marginal downlink, joint uplink/ downlink coverage probabilities and product of uplink and downlink coverage probabilities for nearest BS association criteria with  $\epsilon = 1$ .

and rest of users are associated to pico BSs where path losses are higher and antenna gain is lower ( $2dB$ ). In a nut shell, UL SINR in C2 improves than C1 and C3 due to the difference in antenna gains of macro and pico BSs.

Further it should be noted that by utilizing fractional power control in heterogeneous cellular network uplink, coverage probability has improved in all criteria with the increase in  $\epsilon$ . The reason is that the users transmit with more power by increasing  $\epsilon$  which ultimately improves their intended power. The optimum value of  $\epsilon$  required is less than 0.5 to get highest coverage in uplink. In fact,  $\epsilon = 0.5$ , was reported as an optimal value in ad-hoc wireless networks [14][39].

The Transmission Success Probability (TSP) as the probability of both uplink/downlink SINR being greater than the certain threshold  $x$  described in eq. 4.2.5 is shown in Fig. 5.6, Fig. 5.7 and Fig. 5.8 for C1, C2 and C3 cases respectively.

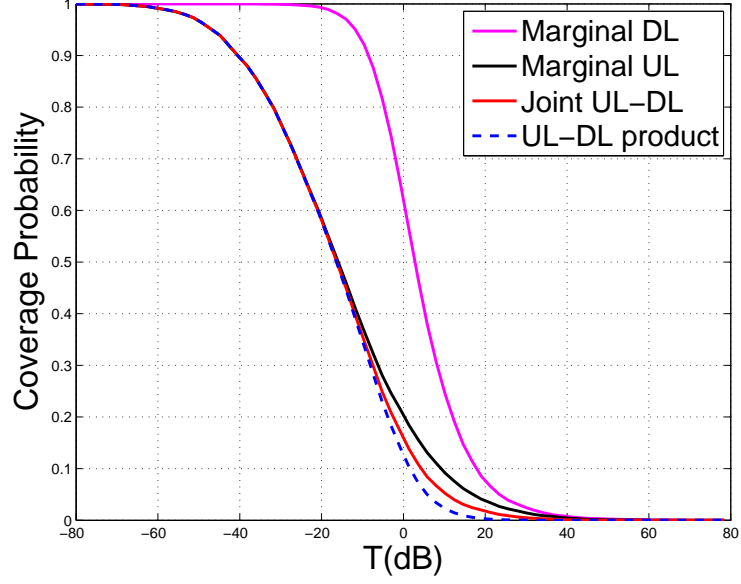


Figure 5.7: Marginal uplink, marginal downlink, joint uplink and downlink coverage probabilities and product of uplink and downlink coverage probabilities for average BS association criteria with  $\epsilon = 1$ .

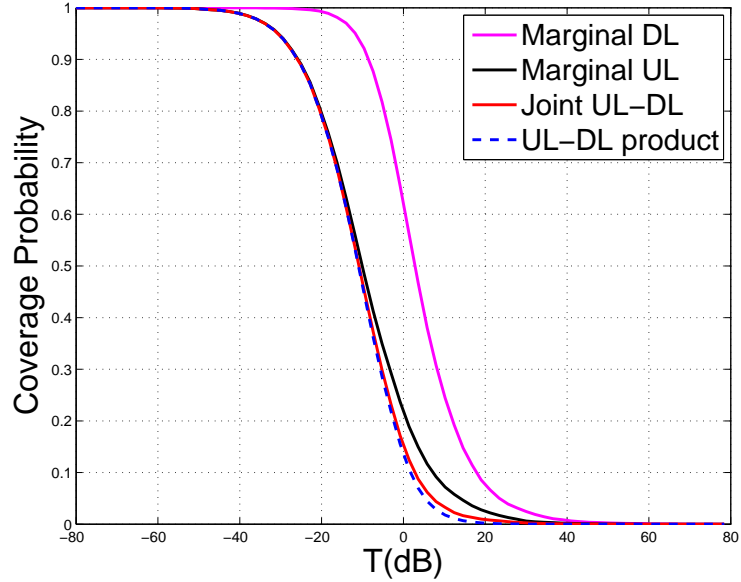


Figure 5.8: Marginal uplink, marginal downlink, joint uplink and downlink coverage probabilities and product of uplink and downlink coverage probabilities for average BS association criteria in DL and minimum path loss association in UL with  $\epsilon = 1$ .

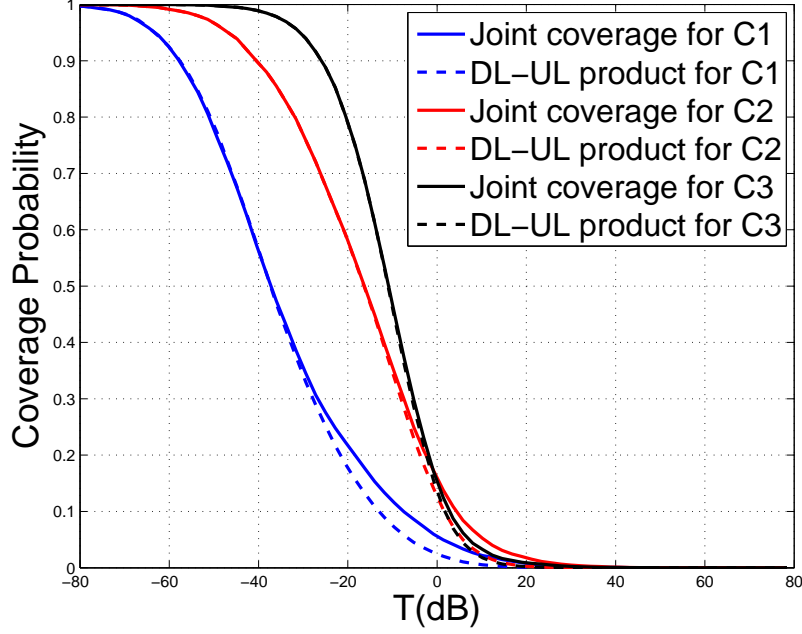


Figure 5.9: Joint uplink/downlink transmission success probability for three association criteria compared to the probability evaluated from independence assumption.

As both SINRs should be greater than  $x$ , TSP is always lower than both marginal probabilities. Independence assumption between marginal SINRs is also explored in those figures. TSP is compared to the product of marginal uplink and downlink probabilities. If both SINRs were independent, both results should fit. However, it is conspicuous that TSP is not simply equal to the product of marginal uplink and downlink probabilities. Dependence is stronger under the nearest BS association criteria (C1) compared to that of maximum average received power (C2) and C3 cases as shown in Fig. 5.9.

### 5.2.2 Spectral efficiency

We have up to now discussed the CCDF of SINR for marginal uplink, marginal downlink and joint uplink/ downlink which is nothing but a coverage, a measure

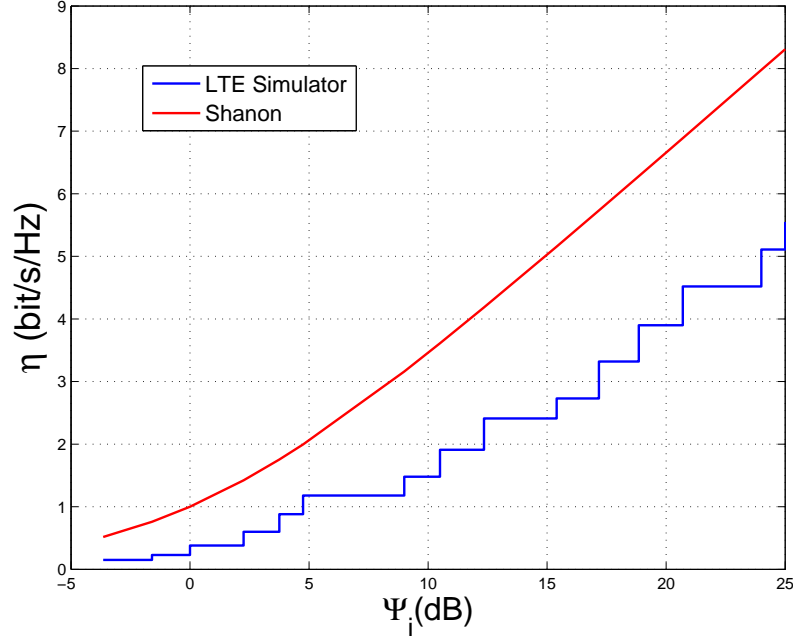


Figure 5.10: Shannon and LTE Simulator Spectral Efficiency with simulation switching thresholds for Adaptive Modulation and Coding (AMC).

of system performance. Now we focus on the spectral efficiency performance under adaptive modulation and coding. The set of switching thresholds considered in this work, shown in Table 5.3, were designed with the help of an LTE link simulator available in [29]. Fig. 5.10 shows the spectral efficiency values for Shannon and LTE simulator as per SINR switching thresholds for adaptive modulation and coding. They maximize the spectral efficiency while the instantaneous BLER does not raise the 10% target block error rate (BLER) at any point of the interval. Ideal channel estimation and reporting have been assumed. For SNR values below the minimum threshold (i.e., in very poor channel conditions), there is an outage state in which there is no data transmission.

From the comparison of downlink marginal probabilities of spectral efficiency for C1, C2, and C3 criteria as shown in from Fig. 5.11 to Fig. 5.19, it is quite clear (and foreseeable) that the downlink coverage probability under C2 association criteria is

## 5.2. DISTRIBUTION OF MAIN PERFORMANCE INDICATORS FOR DEFAULT SYSTEM PARAMETERS

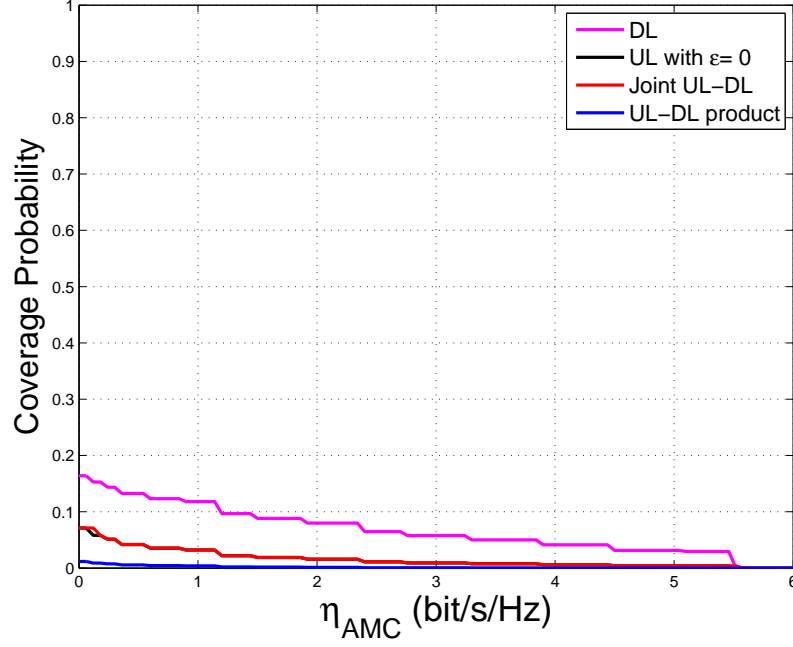


Figure 5.11: Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C1 association criteria with  $\epsilon = 0$ .

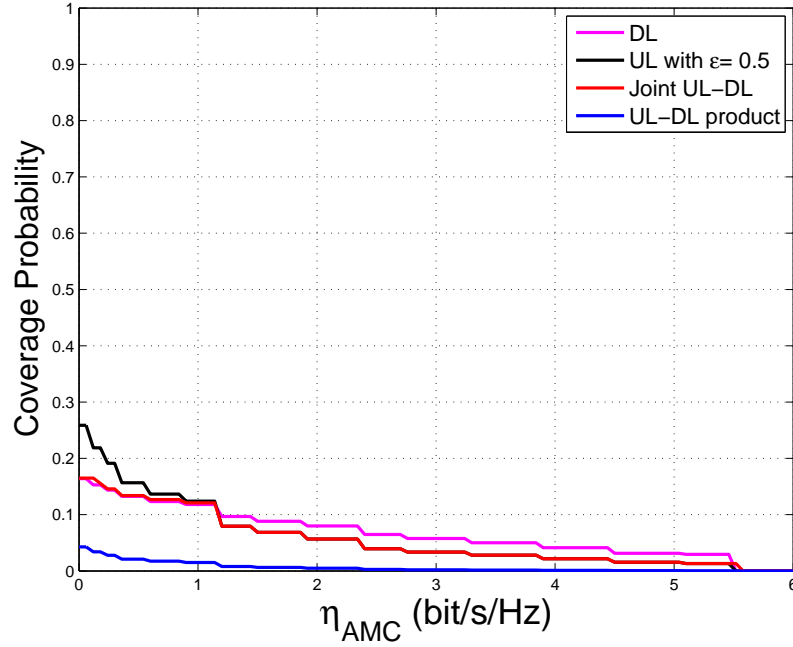


Figure 5.12: Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C1 association criteria with  $\epsilon = 0.5$ .

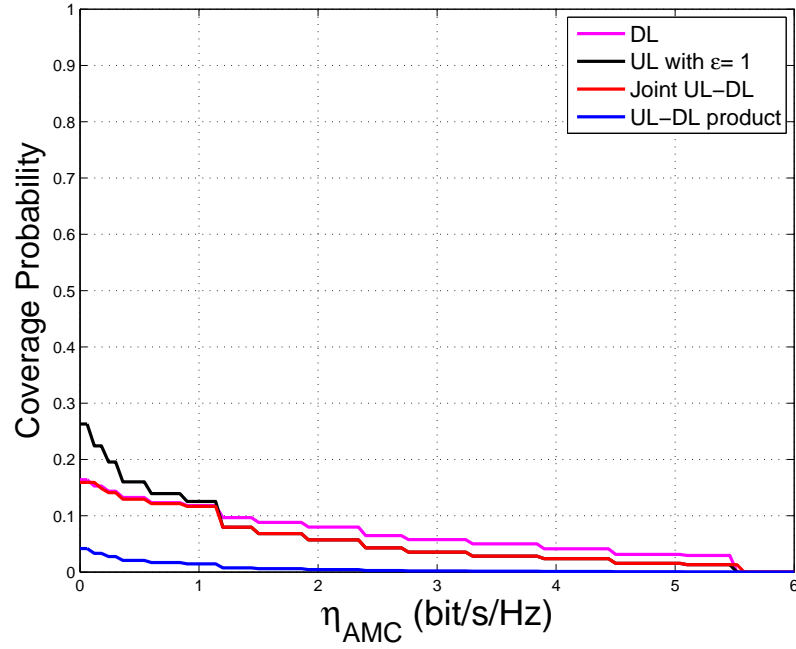


Figure 5.13: Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C1 association criteria with  $\epsilon = 1$ .

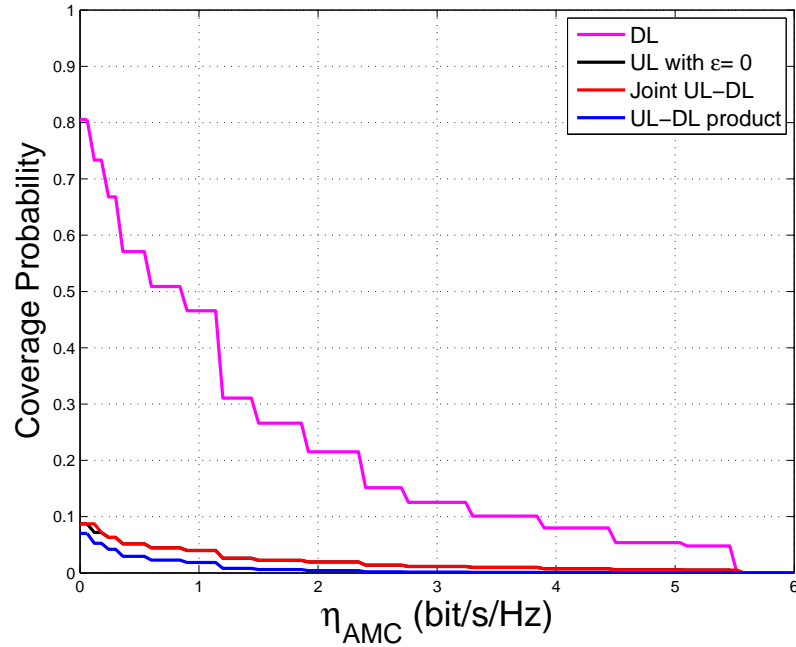


Figure 5.14: Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C2 association criteria with  $\epsilon = 0$

## 5.2. DISTRIBUTION OF MAIN PERFORMANCE INDICATORS FOR DEFAULT SYSTEM PARAMETERS

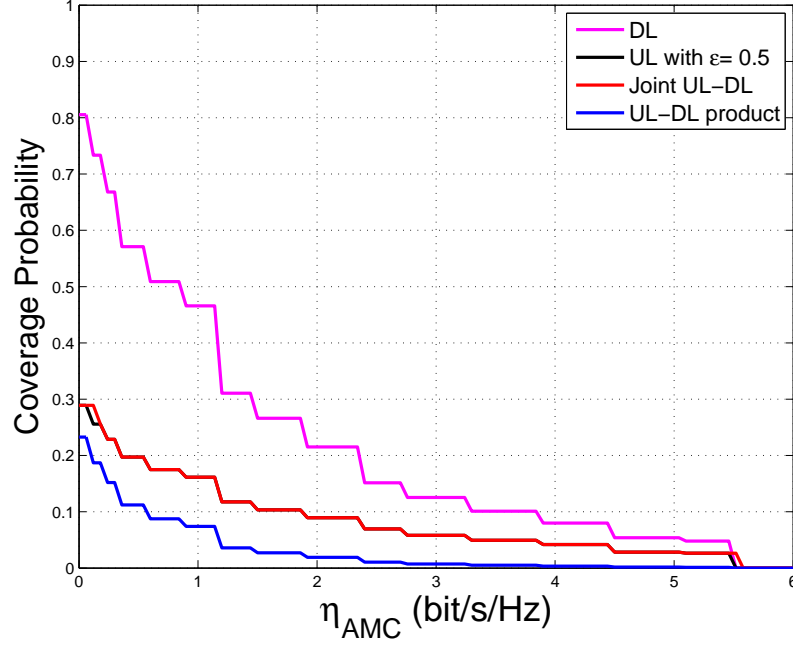


Figure 5.15: Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C2 association criteria with  $\epsilon = 0.5$ .

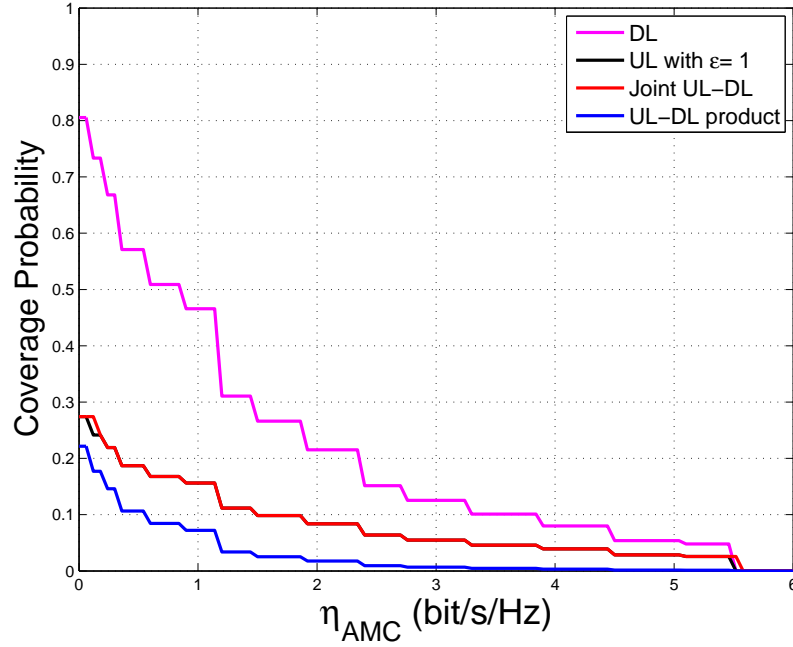


Figure 5.16: Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C2 association criteria with  $\epsilon = 1$ .



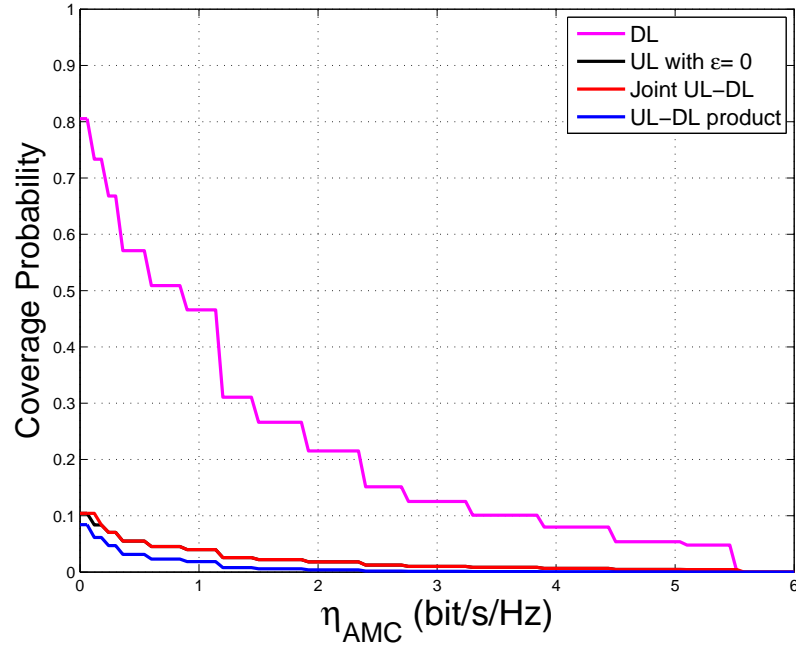


Figure 5.17: Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C3 association criteria with  $\epsilon = 0$ .

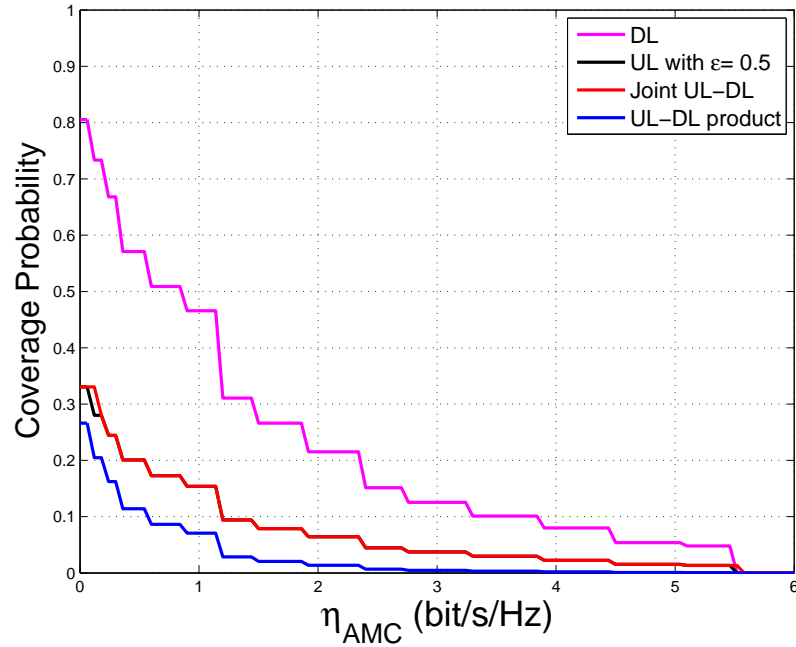


Figure 5.18: Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C3 association criteria with  $\epsilon = 0.5$ .

## 5.2. DISTRIBUTION OF MAIN PERFORMANCE INDICATORS FOR DEFAULT SYSTEM PARAMETERS

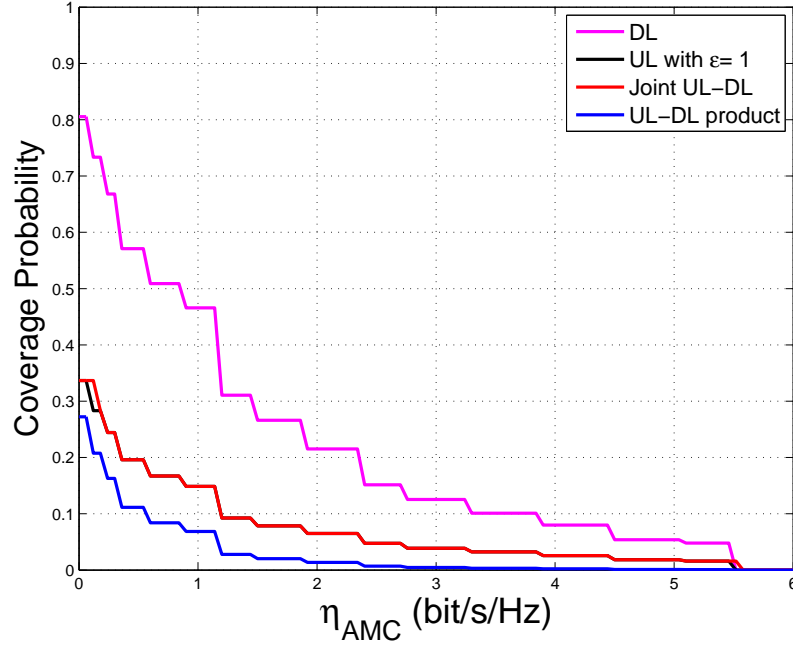


Figure 5.19: Marginal uplink, marginal downlink, Joint uplink/downlink and product of uplink/downlink spectral efficiency for C3 association criteria with  $\epsilon = 1$ .

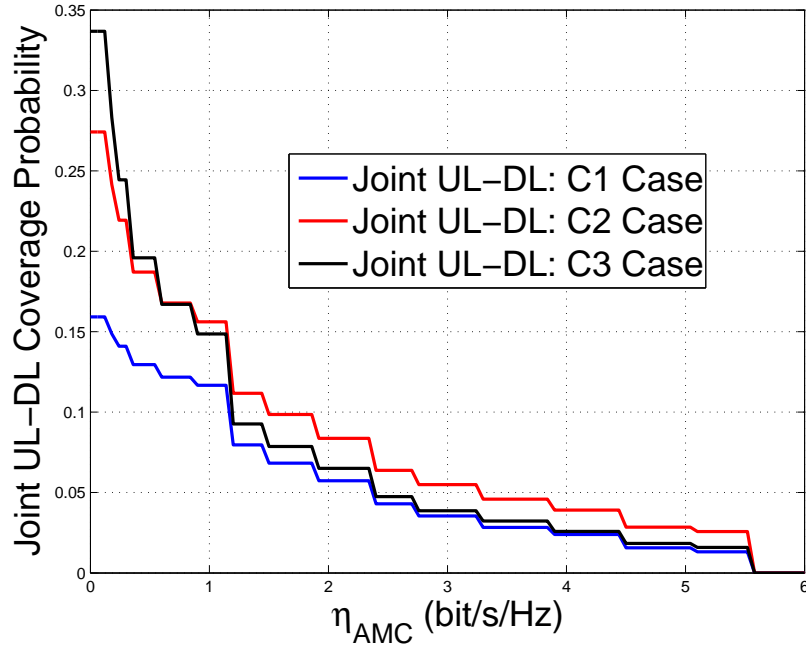


Figure 5.20: Joint uplink/downlink spectral efficiency coverage for C1, C2 and C3 association criteria with  $\epsilon = 1$ .

Table 5.3: Simulation switching thresholds for adaptive modulation and coding.

$\Psi_i(dB)$	-3.7 , -1.6 , 0.0 , 2.3 , 3.8 , 4.8 , 9.0 , 10.5 , 12.4 , 15.4 , 17.2 , 18.9 , 20.7 , 24
$\log_2(M_i)$	0.2 , 0.2 , 0.4 , 0.6 , 1.2 , 1.5 , 1.9 , 2.4 , 2.7 , 3.3 , 3.9 , 4.5 , 5.1 , 5.6

much better than that of C1. As the uplink and downlink has different transmit power so the coverage probability for the uplink and downlink is different. Dependency of uplink and downlink is shown in these figures as the product of uplink and downlink which is not equal to the joint uplink and downlink.

Results for downlink, uplink and symmetrical spectral efficiency for all association criteria are shown in same set of figures as mentioned before. For C1, the results are shown in Fig. 5.11, Fig. 5.12 and Fig. 5.13. In this case, uplink has only better spectral coverage probability than the downlink for full power control  $\epsilon = 1$  and only for low values of spectral efficiency ( $\eta_s$ ). The joint uplink/downlink coverage is forced to be lowered by the spectral coverage whichever has lower values i.e., minimum of uplink and downlink. As we increase the fractional power control  $\epsilon$  from 0 (no power control) to 1 (full power control), the uplink coverage has improved which improves the joint spectral coverage probability. Thus, for a symmetrical transmission, using power control improves the system performance.

Results when user is associated to the BS which is received with stronger average power in the DL (C2) are shown in Fig. 5.14, Fig. 5.15 and Fig. 5.16. In this case, downlink coverage is much better than uplink. However, for higher values of  $\epsilon$ , uplink is improving which ultimately improves the joint coverage spectral efficiency probability and is higher than that of C1 case because of better downlink coverage as shown in Fig. 5.20.

Similarly, the results of utilizing C3 criteria are shown in Fig. 5.17, Fig. 5.18 and Fig. 5.19. Although the behaviour is similar to that of C2 criteria, the joint spectral coverage probability is higher only for lower values of spectral efficiency

approximately less than  $0.5 \text{ bit/s/Hz}$  and above this value spectral coverage under C2 is better than C3 association criteria as shown in Fig. 5.20 for the same reason of difference in antenna gains of macro and pico BSs as mentioned before for SINR coverage probability. It is also worth noting that the results for  $\epsilon = 0.5$  and 1 are the same which indicates that the value of  $\epsilon$  required for optimum results is less than 0.5 and it is found to be 0.2 where users reach their maximum transmit power as will be discussed in section 5.3.3.

Thus, the parameter set {C2 criteria, partial FPC} is the best option to reach high symmetric spectral efficiency.

### 5.2.3 Binary rate

Random variable transformation as described by eq. 4.4.1 and eq. 4.4.4 converts SINR into spectral efficiency rate for Shannon upperbound and adaptive modulation and coding, respectively. We are mainly showing results for realistic AMC as Shannon performance is similar except for its improvement due to the SNR-gap between them [32]. Moreover, as previously described, for SNR values below the minimum threshold (i.e., in very poor channel conditions), there is an outage state in which there is no data transmission. Opposite, transmission would always be carried out under any SINR if Shannon limit is considered.

The joint rate coverage probability as given by eq. 4.5.3 along with marginal uplink/downlink rate coverage probabilities have been evaluated for adaptive modulation and coding. Results for nearest (association criteria C1), average criteria in DL and coupled UL (C2), and average association in DL and minimum path loss in UL (C3) are shown in Fig. 5.21, Fig. 5.22, and Fig. 5.23, respectively. Uplink results have been obtained with no fractional power control  $\epsilon = 0$  as well as utilizing fractional power control of  $\epsilon = 0.5$  and full power control ( $\epsilon = 1$ ).

A comparison of those three figures shows that the marginal downlink coverage

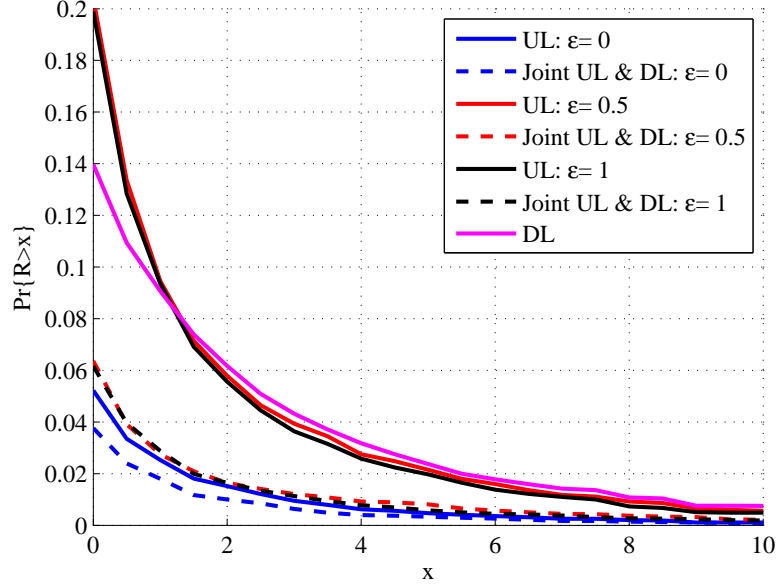


Figure 5.21: Marginal uplink, marginal downlink and joint AMC binary rate coverage probabilities for association to the nearest BS (association criteria C1). ( $x$  in Mbps.)

using average BS criteria is better than the nearest BS criteria, as expected. For the uplink coverage, that of minimum path loss criteria improves the received power at uplink although its results are close to those of C1 criteria.

As for joint rate coverage, please note that as both UL and DL rates should be over the value  $x$ , the result is equivalent to find the minimum of both. Not being independent [42], result cannot be found as the product of both marginal CCDFs. Different performance can be found as per association criteria, discussed in chapter 3 and their summary is shown in Table 3.1. Being basically limited by the UL, criteria C2 is the worst without power control. However, it overcomes to association to the nearest BSs if uplink power control is employed, even if it is not full (i.e.,  $\epsilon \neq 1$ ). Of course, giving freedom to UL to associate to its best BS, decoupled from downlink, improves the joint coverage (association criteria C3). However, without UL power control ( $\epsilon = 0$ ) nor range expansion biasing ( $\tau = 0dB$ ), the simpler criteria for

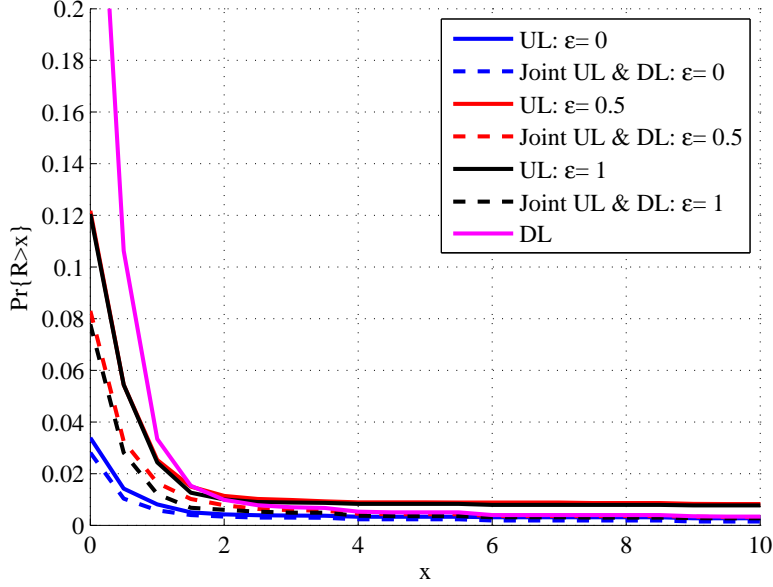


Figure 5.22: Marginal uplink, marginal downlink and joint AMC binary rate coverage probabilities for average association in DL and coupled UL (association criteria C2). ( $x$  in Mbps.)

distance C1 have similar results to those of decoupled C3. Only when other design parameters are taken into account, the complexity of decoupling might be considered worthy.

### 5.3 Effects of system design parameters on system performance

We have presented up to now the coverage simulation results for a set of default system parameters as described in Table 5.1. We also discussed the CCDF of rate for marginal uplink, marginal downlink and joint uplink/downlink. However, giving insight from them is difficult. Now we present simulation results with the variation of each of these parameters to get insights about the impact of each of these parameters

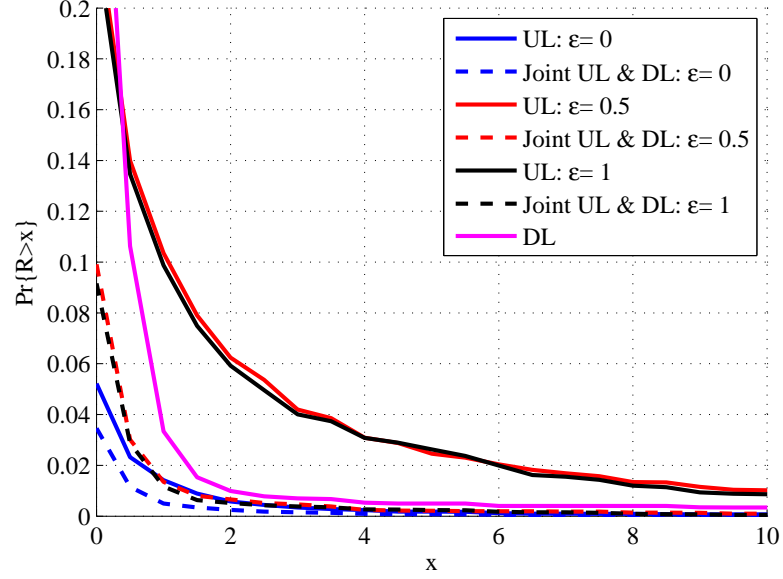


Figure 5.23: Marginal uplink, marginal downlink and joint AMC binary rate coverage probabilities for average association in DL and minimum path loss in UL (association criteria C3). ( $x$  in Mbps.)

on coverage and other performance indicators such as average rates and Jain's index which are presented as following. From this section on, we are trying to disentangle the impact of system parameters on the downlink-uplink joint performance and their relation to different association criteria. We consider a first set of parameters (those above the double line in Table 5.1), such as user density factor  $\gamma$ , or range expansion bias for pico cells  $\tau$ , as possibly variable. A second set of system parameters (those below the double line), such as the maximum user transmission power,  $P_{max}$  or path loss slopes and exponents, have been considered fixed. Thus, default parameter values as given by Table 5.1 are used except when specifically stated. Simulations are carried out over a single parameter range. In general, default values for the other parameters are kept as those shown in the last column of Table 5.1. Performance indicators which have been obtained from simulations are presented in Table 5.2.

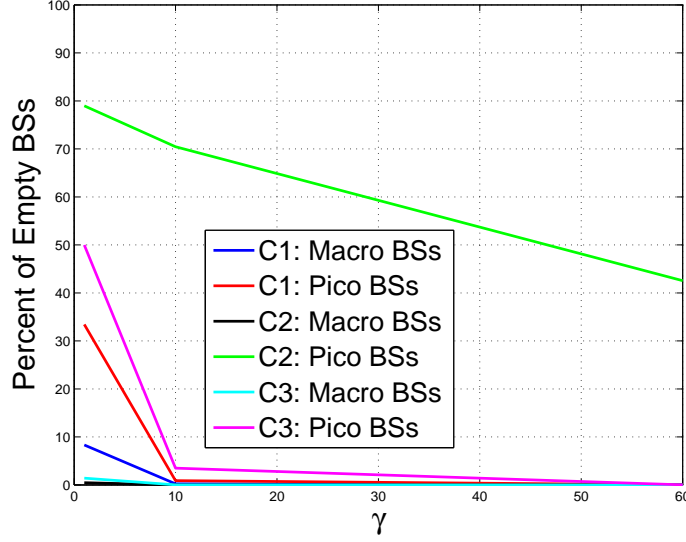


Figure 5.24: Percent of empty macro and pico BSs under C1, C2 and C3 criteria with  $\gamma = 1, 10$  and  $60$ .

### 5.3.1 User density and limit of associated users

Let's first discuss the effect of the user density ( $\gamma$ ) on the system performance. Please, note that the effect of decreasing  $\gamma$  is equivalent to adding more infrastructure (while keeping the ratio between macro and pico cells). Firstly, we discuss the effect of  $\gamma$  on coverage probability ( $P_c$ ) using three association criteria. The effect of  $\gamma$  increase or decrease can be easily understood with the help of Fig. 5.24 in which percent of empty macro and pico BSs are shown for three association criteria under consideration. The coverage results of each of three association criteria with variation of  $\gamma = 1, 10$  and  $60$  are shown in figures from Fig. 5.25 to Fig. 5.27. Please, note that with increase/decrease of  $\gamma$ , there will be an statistical increase/decrease in the number of users in a network where as the total number of BSs remain the same.

The results for C1 criteria are shown in Fig. 5.25. For  $P_c^D$ , it is quite evident that at  $\gamma = 10$  and  $60$ , coverage is the same but lower than that obtained at  $\gamma = 1$ . The reason can be easily understood by noticing that at  $\gamma = 1$ , there are approximately



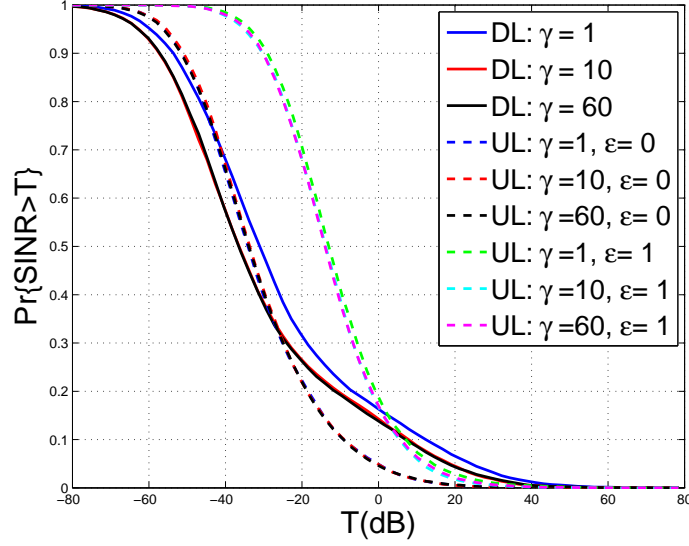


Figure 5.25: Impact of  $\gamma$  on marginal uplink and downlink coverage probabilities for association criteria C1.

41% (8% macro and 33% pico) BSs are empty as visible from results in Fig. 5.24. It means that 41% of BSs do not interfere towards intended user in DL. However, at  $\gamma = 10$ , none of the BS is empty and all BSs contribute their interference in DL and with increase of  $\gamma$  from 10 to 60, only the load per macro cell ( $N^M$ ) increases and so shall in that criteria as shown in Fig. 5.28(b) while the number of interference contributing BSs in DL towards intended user remains the same. Hence, the coverage at  $\gamma = 10$  and 60 is same but it is worst than the coverage for  $\gamma = 1$ .

For  $P_c^U$  at  $\epsilon = 0$ , there is no impact on the coverage of increase/decrease in  $\gamma$  from default value of 10. The reason is that only one user per cell interferes the intended user in UL. Although the number of interferers increase by the filling of empty BSs as  $\gamma$  grows, with  $\epsilon = 0$  the power of interfering users is quite low. However, at  $\epsilon = 1$ , the users transmit with maximum power in UL and  $P_c^U$  slightly reduces with the increase in  $\gamma$ . Results are the same for  $\gamma = 10$  and 60 as at these values, almost none of the BS is empty.

Fig. 5.26 and Fig. 5.27 show the results for criteria C2 and C3 respectively.  $P_c^D$  is

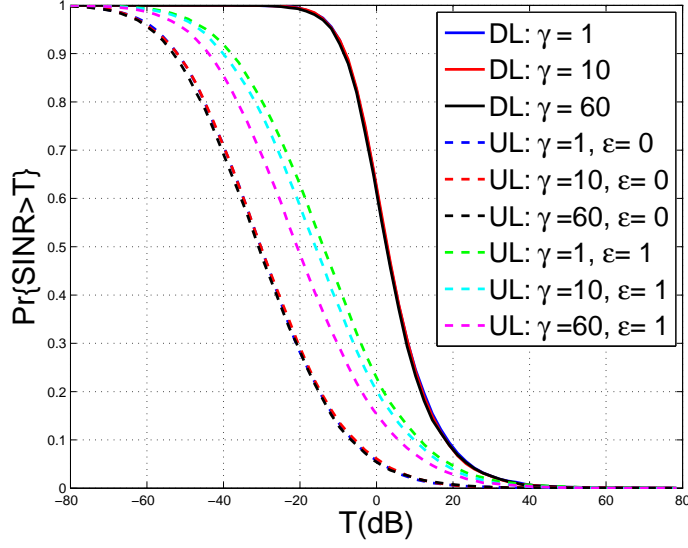


Figure 5.26: Impact of  $\gamma$  on marginal uplink and downlink coverage probabilities for association criteria C2.

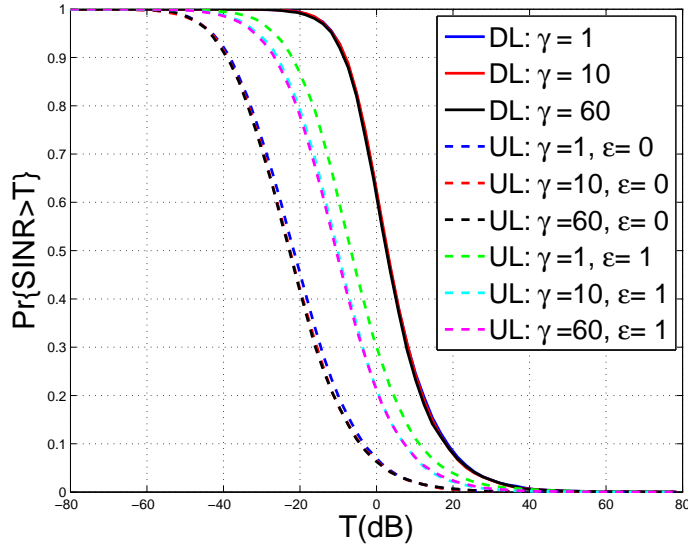


Figure 5.27: Impact of  $\gamma$  on marginal uplink and downlink coverage probabilities for association criteria C3.

not affected by the increase in  $\gamma$ . The reason is that in C2 criteria users are camped to macro BSs and have very strong intended power in DL as compared to those in C1 criteria where users are attached to pico BSs. Thus, although the increase in  $\gamma$  produces more users, new interfering BSs are mainly pico BSs previously empty, and their interference power is low compared to intended signal from macro BS, thus they do not interfere much in C2 criteria in comparison to C1 case. The same is the reason for DL coverage in C3 case.

The  $P_c^U$  in C2 and C3 cases is also not affected by  $\gamma$  when  $\epsilon = 0$  and it is reducing with the increase in  $\gamma$  at  $\epsilon = 1$  for the same basis of low UEs power and high UEs power respectively as discussed under C1 criteria. The difference of  $P_c^U$  at  $\epsilon = 1$  for C2 and C3 cases is related to number of empty pico BSs in both cases.

Note that the number of users' limit  $N_{max}$  has only impact on user's activity and inactivity which affects the other performance metrics but not the SINR coverage probability.

Fig. 5.28 shows different results as a function of the user density from  $\lambda_u = \lambda_{BS}$  (very dense networks) upto  $60\lambda_{BS}$  (very loaded networks).

Beginning with top left of the Fig. 5.28, Fig. 5.28(a) shows the evaluation of average percentage of users connected to macro/pico base stations ( $A^l$ ) where as Fig. 5.28(b) presents the average load for non-empty BSs ( $N^l$ ). Fig. 5.28(c) shows the average percent of inactive users with macro/pico BSs ( $I_n^l$ ). Percent of users in outage,  $Out^l$  (no transmission due to fading reasons) are shown in Fig. 5.28(d). Association has an effect on the probability of user outage. Conditioned to certain position, associating them to pico or macro base stations will modify the average SINR and thus, the probability of faded SINR being below the minimum AMC threshold. Spectral efficiencies  $\eta^l$  and rates  $R^l$  are averaged for marginal UL/DL transmissions in Fig. 5.28(e) and Fig. 5.28(f) respectively under realistic adaptive modulation and coding. Average for joint binary data rate  $R^{sym}$  and Jain's index

### 5.3. EFFECTS OF SYSTEM DESIGN PARAMETERS ON SYSTEM PERFORMANCE

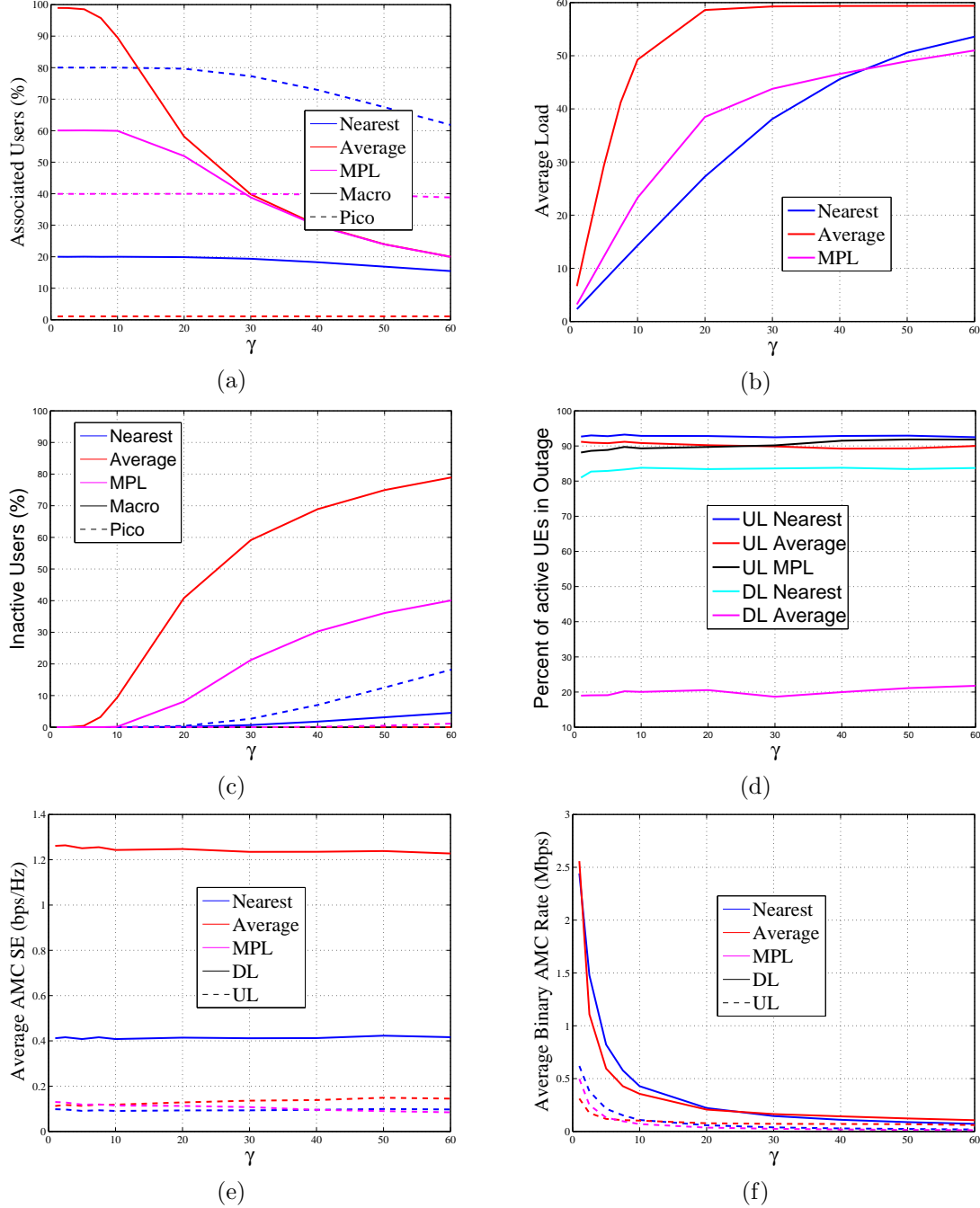


Figure 5.28: System performance as a function of the user density ratio  $\gamma = \lambda_u / \lambda_{BS}$ . a) Average percentage of users connected to macro/pico base stations. b) Average load for non-empty BSs. c) Average percentage of inactive users for macro/pico base stations. d) Average percent of users in Outage. e) Average DL/UL spectral efficiencies for AMC. f) Average DL/UL binary data rate for AMC.

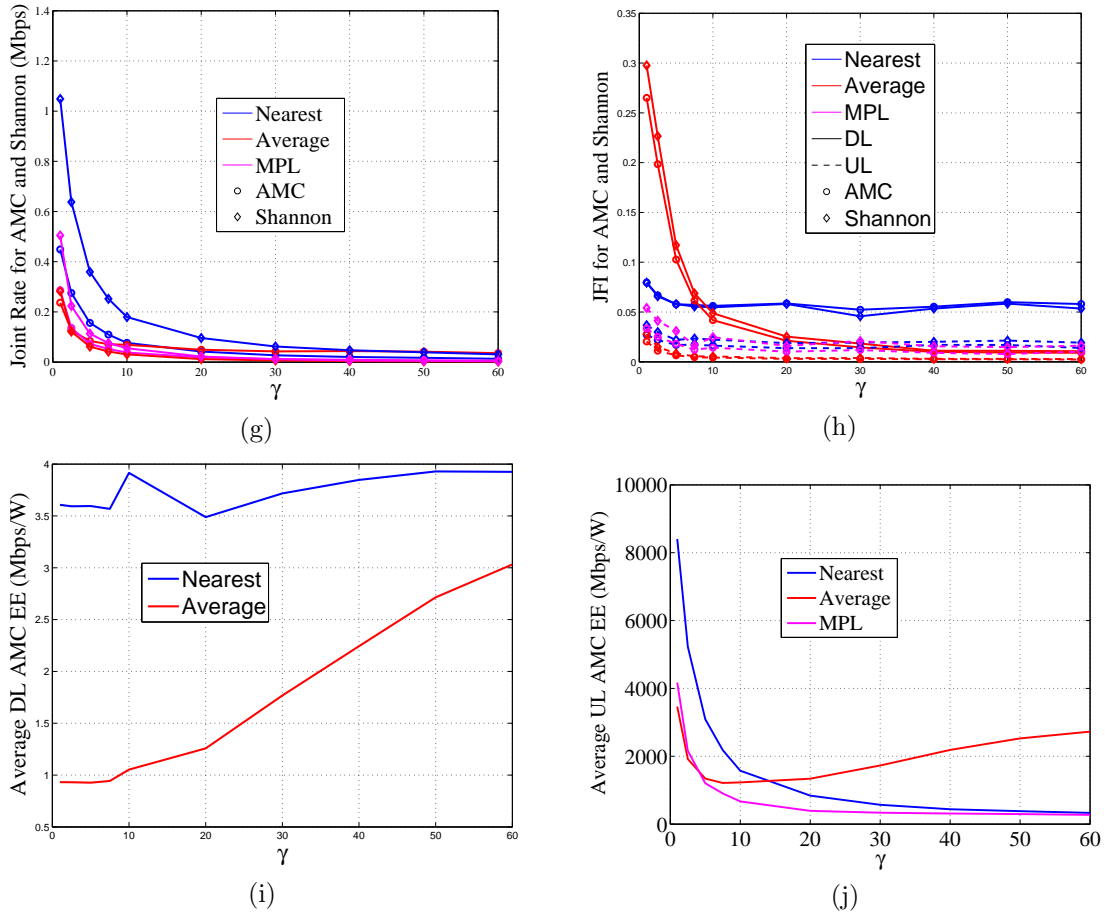


Figure 5.28: System performance as a function of the user density ratio  $\gamma = \lambda_u/\lambda_{BS}$ . g) Joint rate for AMC and Shannon limit. h) Jain's index for marginal rates (AMC and Shannon limit). i) Average DL energy efficiency for active users. j) Average UL energy efficiency for active users.

are shown in Fig. 5.28(g) and Fig. 5.28(h). These results are given for both AMC and Shannon limit. Finally, the results for DL and UL energy efficiency are shown in Fig. 5.28(i) and Fig. 5.28(j) respectively.

Focusing on nearest association criteria (named as C1 in Table 3.1) , 80% of users are associated to pico BSs and 20% of them to macro BSs, consistent with the well known result of association for Voronoi regions applied to default values. However, as user density grows, certain BSs could exceed the maximum number of users allowed to be simultaneously active in a BS,  $N_{max} = 60$  in the figure. First pico BSs and later macro BSs begin to saturate and certain users become inactive as shown in Fig. 5.28(c). When  $\lambda_u = 60\lambda_{BS}$ , about 25% of transmissions could not be carried out as users are inactive, that is, no resources could be allocated to them. At that stage, most BSs are nearly full and their average load ( $N^l$ ) is close to  $N_{max}$  as presented in Fig. 5.28(b)

When association criteria is based on received power at DL (named as C2 in Table 3.1), most users are associated to macro tier due to both, better path loss and higher transmission power. Being their density lower, soon as user density grows, macro cells become full and users tend to become inactive. Thus, for  $\gamma = 10$ , about 10% of users are inactive, i.e., they are not allocated any resources as visible in Fig. 5.28(c). While many pico base stations are empty, most of non empty cells are macro BSs with very high loads, as shown in Fig. 5.28(b). This can be alleviated by the range expansion technique, as it will be discussed later in section 5.3.2.

Spectral efficiency results are presented in Fig. 5.28(e) which are not much influenced by user density neither in DL nor in UL as far as there is at least one user associated to each BS and percent of users in outage are approximately constant in each of association criteria. Although spectral efficiency of downlink ( $\eta_{AMC}^D$ ) is maximum for C2 criteria as less percent of users are in outage as shown in Fig. 5.28(d) for the reason of higher received power, DL binary rate ( $R_{AMC}^D$ ) is not necessarily

higher than that of C1 criteria, as seen from Fig. 5.28(f). The reason is that many macro users are inactive and thus allocated zero rate.  $\eta_{AMC}^U$  for C2 criteria is slightly better with  $\gamma$  as the number of empty BSs under criteria C2 are higher, which reduces number of interferers in UL as compared to C1 and C3. Moreover, more active users share the BS resources, and after  $N_{max} = 60$ , users become inactive as  $\gamma$  grows. As a consequence, user treatment becomes more unfair i.e., Jain's index is lower (see Fig. 5.28(h)). For lower values of  $\gamma$ , although data rate under C1 and C2 are higher but treatment for same values of  $\gamma$  under C2 is better since outage under C2 is lower than C1. Further for higher values of  $\gamma$ , JFI under C2 deteriorates for the reason of inactive users. Note that Jain's index for AMC is very similar to that of Shannon.

Energy Efficiency (EE) of active users in DL and UL is shown in Fig. 5.28(i) and Fig. 5.28(j) respectively.  $EE^D$  under C1 criteria is better than the C2 criteria as most of users are associated with pico tier where BS DL transmit power is lower than macro tier. It should also be noted that  $EE^D$  under C1 and C2 cases is improving owing to the fact that as  $\gamma$  increases, more number of pico BSs are associated with users and probability of user being selected from pico tier increases. In UL, generally EE is decreasing fast for all association criteria for their individual loads as  $\gamma$  is increasing. The average criteria C2 has initially lowest EE of all other association criteria for its highest load but after approximately  $\gamma = 15$  (when BSs under C2 criteria has been saturated but  $\eta^U$  is higher),  $EE^U$  improves for criteria C2 and it is the highest for very loaded networks.

As for the UL, decoupling allows the minimum path loss criteria (C3) to be applied. MPL criteria behavior is somehow in between nearest and average criteria. When no user limit applies, about 60% users are associated to macro BSs, which have better path losses. After user density reaches  $\lambda_u = 10\lambda_{BS}$ , some users become inactive while the 40% of users associated to pico BSs remains constant. Similarly to previously described behavior, MPL criteria is not able to improve nearest BS criteria except

for very dense networks: its spectral efficiency is slightly higher than that of nearest criteria, but the increased load per cell finally results in similar performance. As in other criteria, UL average binary rate decreases fast with  $\gamma$  as more users share the resources of the BS because they are associated after BS is saturated and thus become inactive. In fact, for default  $\gamma = 10$ , not only nearest criteria C1 but also coupled average criteria C2 are able to improve decoupled access.

Previous figures are shown with a loose limit on the user associated to the BSs,  $N_{max} = 60$ . Its influence is now analyzed. Fig. 5.29 shows the same results as those in Fig. 5.28 but as a function of the user limit,  $N_{max}$ .

When user limit is strict, most users are inactive. The minimum signaling limit needed to avoid inactive users is different for distinct user load and association criteria. Thus, for mid loaded networks where  $\gamma = 10$ , user limit should be increased upto 30 for nearest criteria. For dense networks as  $\lambda_{BS} = \lambda_u$ , allowing 10 – 15 users associated simultaneously to each BS is enough to observe the 80 – 20 ratio for each tier association in the nearest criteria. The same value  $N_{max} = 30$  for  $\gamma = 10$  still keeps 40% users inactive for C2 criteria and 10% for C3 criteria as visible from Fig. 5.29(a) and Fig. 5.29(c), and inactivity is noticeable even more for higher  $\gamma$  and less for higher  $N_{max}$ . The reason is that for association criteria C2 (and C3 in DL) almost all users are associated to macro BSs and only 1% users are associated to pico BSs. Again, MPL criteria is somehow in between. Considering the signaling user limit when designing the association criteria seems to be of utmost importance.

Average spectral efficiency and binary rate for adaptive modulation and code as a function of  $N_{max}$  are also shown in mid subfigures Fig. 5.29(e) and 5.29(f). Random selection of active users do not modify users in outage, thus they are constant with  $N_{max}$ . Please, also note that as the user limit grows, there is not an improvement in the average rate. The reason is that although more users are allocated resources as  $N_{max}$  grows, the actual binary rate they get is lower as resources are shared by



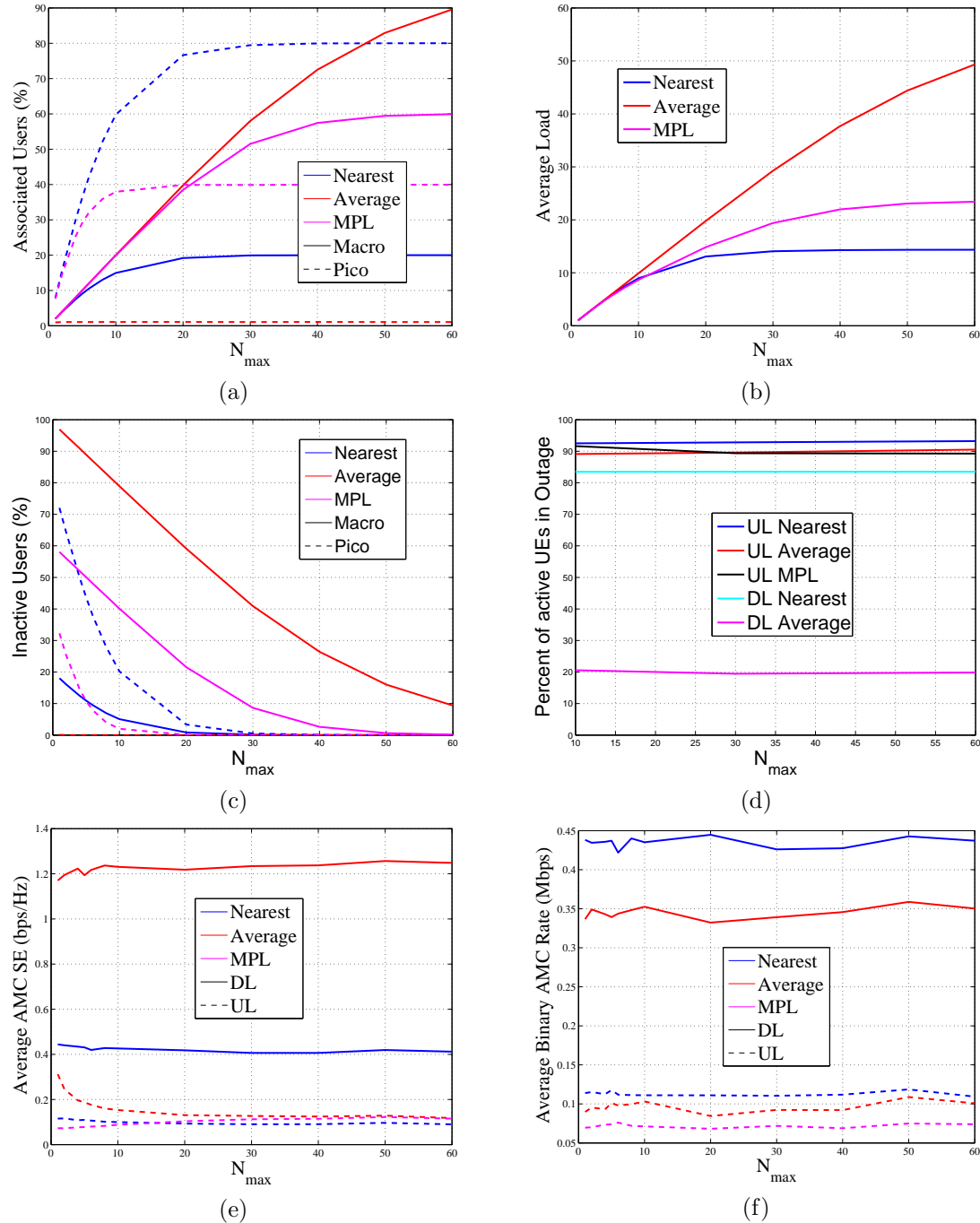


Figure 5.29: System performance as a function of users' limit  $N_{max}$ . a) Average percentage of users connected to macro/pico base stations. b) Average load for non-empty BSs. c) Average percentage of inactive users for macro/pico base stations. d) Average percent of users in Outage. e) Average DL/UL spectral efficiencies for AMC. f) Average DL/UL binary data rate for AMC.

### 5.3. EFFECTS OF SYSTEM DESIGN PARAMETERS ON SYSTEM PERFORMANCE

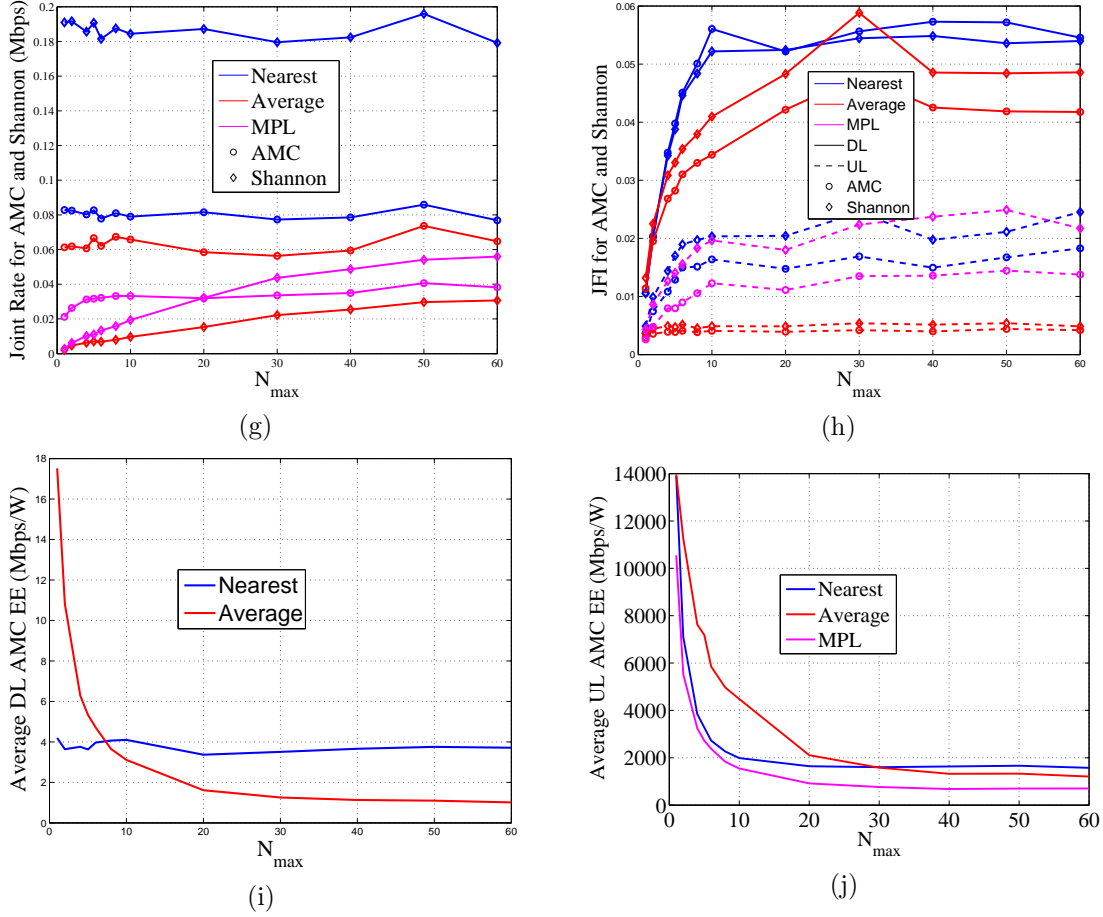


Figure 5.29: System performance as a function of users' limit  $N_{max}$ . g) Joint rate for AMC and Shannon limit. h) Jain's index for marginal rates (AMC and Shannon limit) i) Average DL energy efficiency for active users. j) Average UL energy efficiency for active users.

more users (see Fig. 5.29(b)). Moreover, if rate is compared in UL and DL for all association criteria, it depends upon the inactive plus outage users and load in each association criteria. Average joint rate does not improve much Fig. 5.29(g) although treatment is more fair (Fig. 5.29(h)) as less users are kept with no rate at all.

$EE^D$  under criteria C2 is higher than that of C1 for the  $N_{max}$  values less than 10 for the fact that very few active users are associated to macro tier as compared to pico tier under C1 criteria for the same range of  $N_{max}$ . Thus, overall power consumption of BSs is highest for C1 criteria users when  $N_{max}$  is less than 10 and vice versa for  $N_{max} \geq 10$ .  $EE^U$  is decreasing with growing  $N_{max}$  as number of active users share more BS resources.  $EE^U$  also depends upon the  $\eta_s$  under each association criteria. Energy efficiency results for DL and UL are shown in Fig. 5.29(i) and Fig. 5.29(j) respectively.

### 5.3.2 Pico density and biasing

In this section, effects of layering is studied. Simulations have been carried out as a function of the pico and macro densities' ratio,  $\beta = \lambda_2/\lambda_1$  while total BS density,  $\lambda_{BS}$  is kept to 0.24 BS/Km<sup>2</sup>.  $\beta = 1$  reflects that in average the number of macro and pico cells is same, while  $\beta > 1$  represents the usual case in which more pico cells than macro cells are deployed. As default,  $\beta = 4$  was used in previous simulations. User density is kept to 10 times the total BS density  $\lambda_{BS}$ . Please, note that our results are different from previous works which obtained that as the BS density of the one tier increases, the BS load decreases even in that tier [19]. The reason is that for our results, the total density of BSs is kept constant and only how they are distributed is changed. Results increasing the BS density are equivalent to those reducing user density  $\gamma = \lambda_u/\lambda_{BS}$  presented in previous section 5.3.1.

Initially, we discuss the effect of  $\beta$  on coverage probability ( $P_c$ ) for the three association criteria C1, C2 and C3. Default values for other parameters as shown

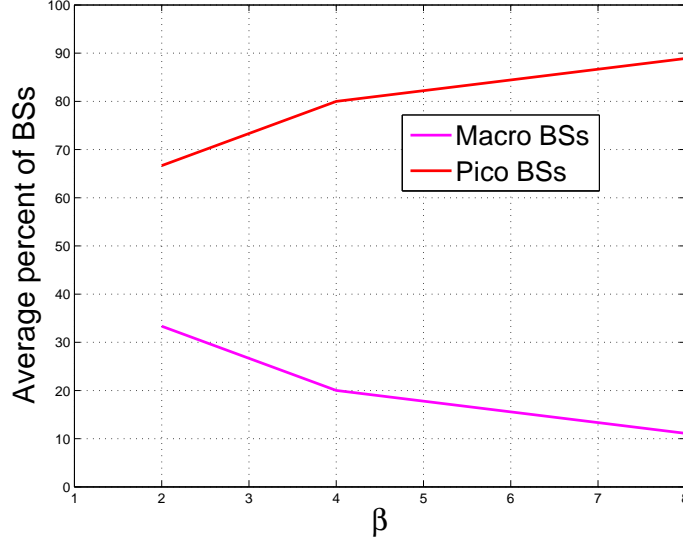


Figure 5.30: Average percent of macro and pico BSs in a network ( $\beta = 2, 4, 8$ ).

in Table 5.1 are employed. The upshot of  $\beta$  change can be easily understood with the succour of results shown in Fig. 5.30 and Fig. 5.31 where average percent of BSs available in a network, and the percent of empty macro and pico BSs for three association criteria under consideration are shown. The coverage results in the range of  $\beta = 2, 4$  and  $8$  are shown in Fig. 5.32, Fig. 5.33 and Fig. 5.34 respectively.

One can easily observe from the results acquired in Fig. 5.30 that by increasing  $\beta$ , the number of BSs in pico tier are increasing while the BSs in macro tier are decreasing by the same amount. Please, keep in mind that under C1 criteria, none of BS is empty as shown in Fig. 5.31 and also recall that lower values of  $T$  (dB) indicates the UEs are at cell edge of their respective cells. The results for  $P_c^D$  corresponding to  $\beta$  are shown in Fig. 5.32 where for cell edge UEs,  $P_c^D$  is higher at  $\beta = 8$  than at  $\beta = 2$ . The reason is that with  $\beta = 2$ , many macro cell edge UEs are quite far away from their macro BSs in comparison to cell edge UEs of pico BSs at  $\beta = 8$ . This phenomenon has a contrary effect for the cell interior UEs for the same values of  $\beta$  because of the difference in power of macro and pico BSs in DL.

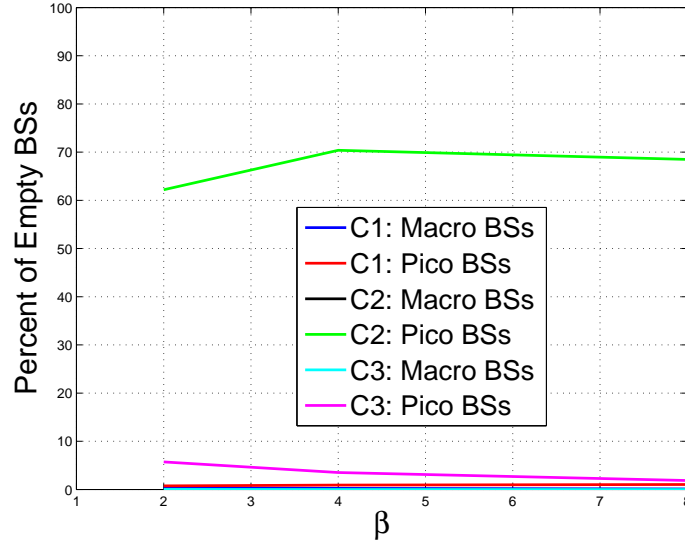


Figure 5.31: Percent of empty macro and pico BSs under C1, C2 and C3 criteria ( $\beta = 2, 4, 8$ ).

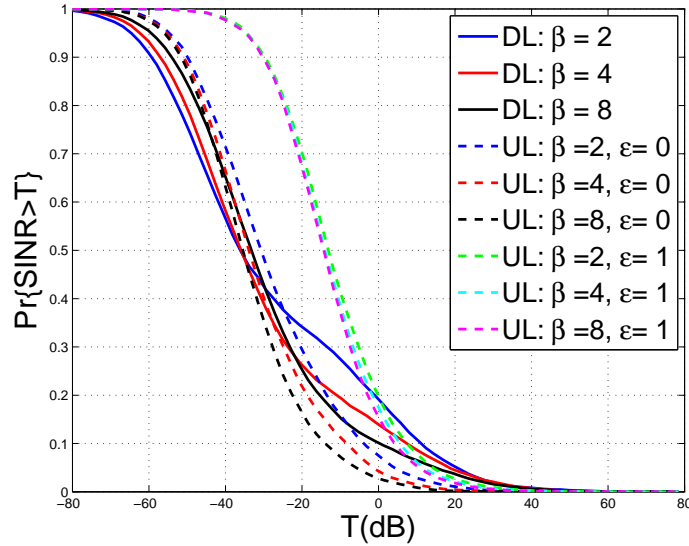


Figure 5.32: Impact of  $\beta$  on marginal uplink and downlink coverage probabilities for association criteria C1.

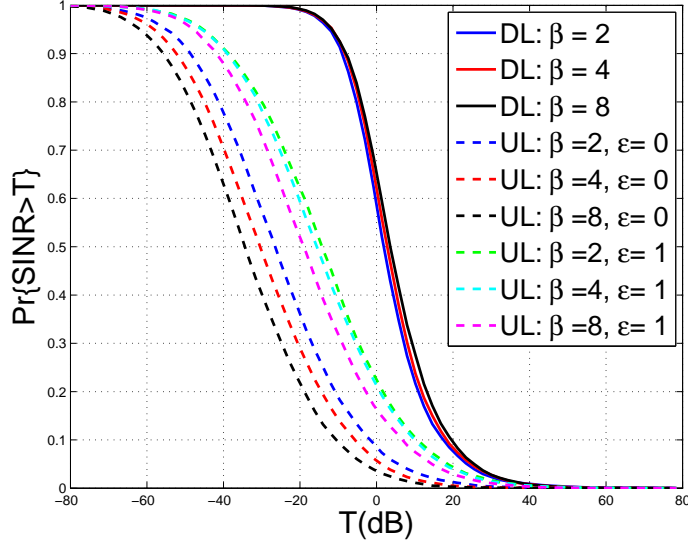


Figure 5.33: Impact of  $\beta$  on marginal uplink and downlink coverage probabilities for association criteria C2.

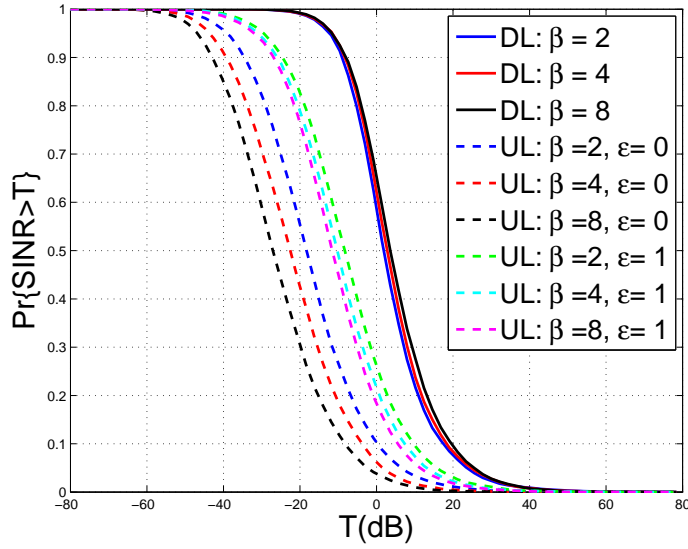


Figure 5.34: Impact of  $\beta$  on marginal uplink and downlink coverage probabilities for association criteria C3.

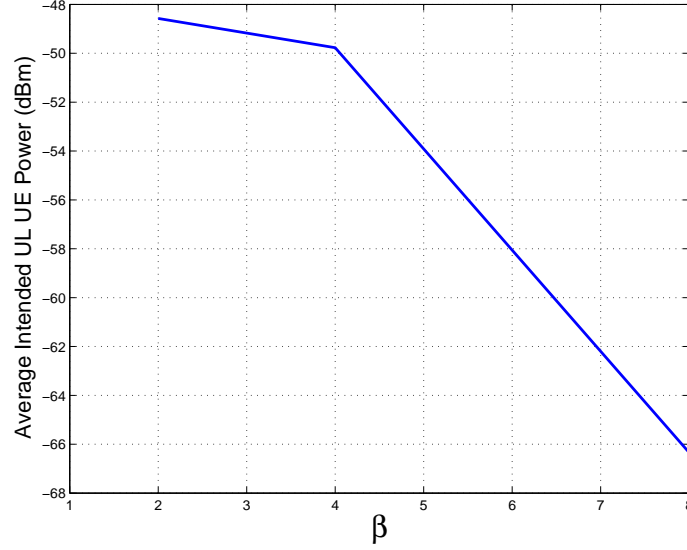


Figure 5.35: Average Intended UL UE Power in dBm under criteria C2 without power control ( $\beta = 2, 4, 8$ ).

To discuss  $P_c^U$ , at  $\epsilon = 0$  and 1, all UEs in UL transmit with same power of 0 dBm or 23 dBm respectively so when  $\beta$  has been escalated, more macro BSs are replaced by pico BSs in a network. This results in more UEs to be camped to pico BSs. Their path losses are likely higher than those of UEs connected to macro BSs at  $\beta = 2$ . This fact is also true for criteria C3. Thus,  $P_c^U$  reduces with increase in  $\beta$  under criteria C1 and C3, at  $\epsilon = 0$  and 1, as shown in Fig. 5.32 and Fig. 5.34, respectively.

The  $P_c^D$  results for C2 and C3 are same and shown in Fig. 5.33 and Fig. 5.34. As  $\beta$  is escalating from 2 to 8, pico BSs increase from 67% to 88% where as macro BSs are decreasing from 33% to 12% as shown in Fig. 5.30 but the UEs still camp to macro BSs despite the decrease in number of macro BSs. This increases the cell load but decreases the number of interfering BSs and, thus, the DL coverage is improving with increase in  $\beta$  from 2 to 8.

The results regarding  $P_c^U$  under criteria C2 without power control ( $\epsilon = 0$ ) are shown in Fig. 5.33. Likewise in C1 and C3 criteria,  $P_c^U$  declines as  $\beta$  is soaring from 2

to 8. The cause is that by replacing macro BSs with pico BSs, in average the distances of UEs from macro BSs increase which apparently reduces the power of intended UEs as shown in Fig. 5.35 and consequently the  $P_c^U$  diminishes with higher values of  $\beta$ .

Further we present simulation results for other performance metrics. Fig. 5.36(a) shows the average percentage of users connected to macro/pico cells. Macro and pico cell users are shown with same color as solid and dashed lines respectively. For nearest criteria and  $\beta = 1$ , half of the users are associated to pico BSs and half to macro BSs as expected. As  $\beta$  grows, the percentage of users associated to pico cells also does as the ratio  $\frac{\beta}{\beta+1}$ . For minimum path loss criteria, behavior is similar although load for both tiers is equal for  $\lambda_2 \approx 6\lambda_1$ .

The results of spectral efficiency and binary rate are shown in Fig. 5.36(e) and Fig. 5.36(f). As more pico BSs and less macro cells are deployed in the system, spectral efficiencies  $\eta_{AMC}^D$  for C1 and  $\eta_{AMC}^U$  for all association criteria decreases seeing that outage under these criteria increases (Fig. 5.36(d)). However,  $\eta_{AMC}^D$  under C2 slightly increases with  $\beta$  for the same fact of outage behaviour, decreasing in this case. The behaviour of users in outage depends upon the association of users to specific tier and the percent of active users under all association criteria as shown in Fig. 5.36(d). Under C1 criteria, as  $\beta$  grows, more and more users camp in pico cells, experiencing high path loss as compared to users associated to macro tier and consequently have more faded signal specially in UL. For C2 criteria, binary rate at DL,  $R_{AMC}^D$ , is higher for  $\beta = 1$  as at this point, load is minimum.  $R_{AMC}^D$  decreases as more macro BSs are exchanged by picocells ( $\beta > 1$ ) as under this criteria users are still associated to macrocells, thus inactive users are growing. The average percentage of users associated to them decreases almost linearly with  $\beta$  due to the aforementioned effect of user limit (here  $N_{max} = 60$ ) as shown in Fig. 5.36(a). Those users become inactive instead of associated to pico cells, mostly empty which can be seen in Fig. 5.36(c). Even if spectral efficiency average  $\eta_{AMC}^D$  increases with  $\beta$ , only



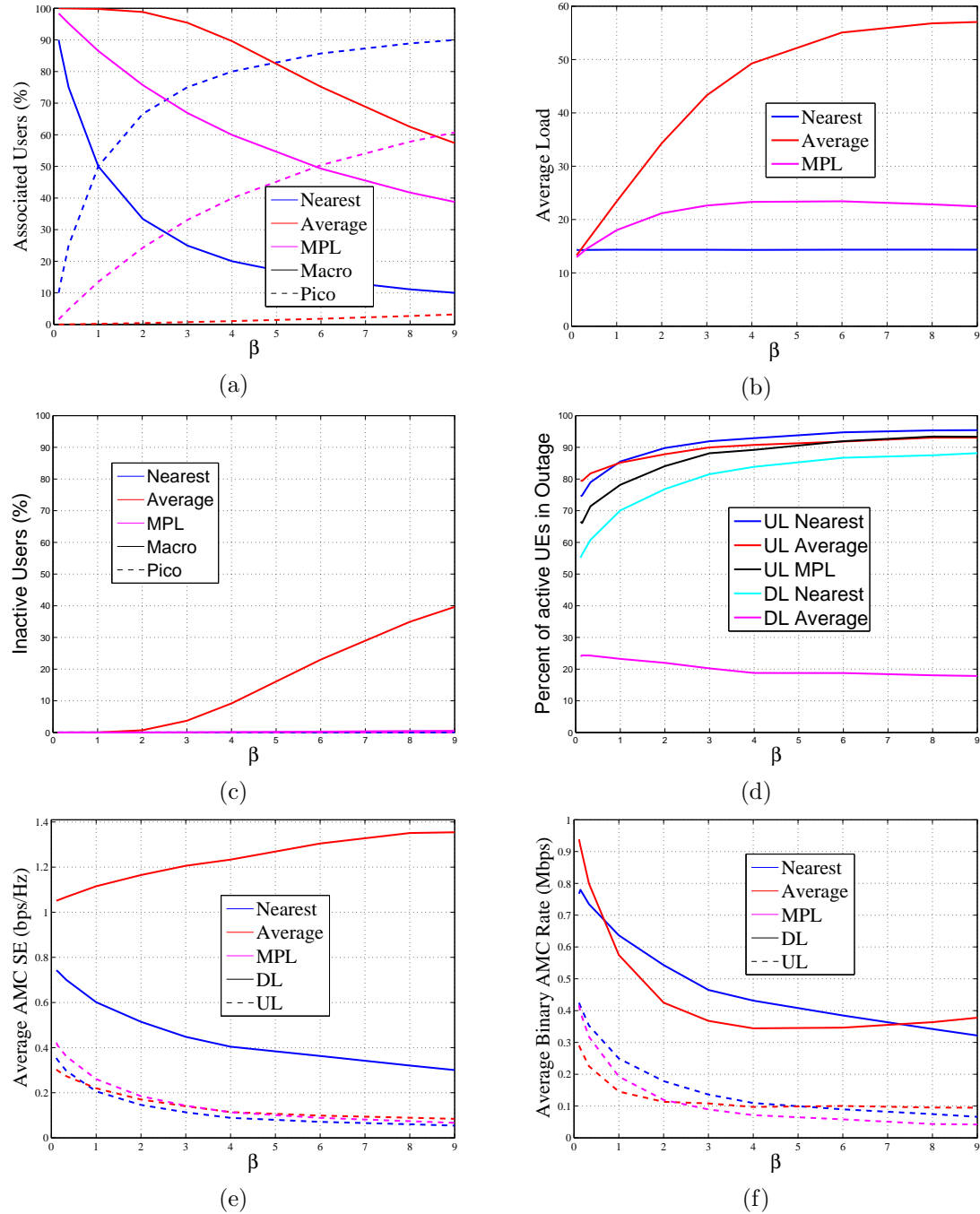


Figure 5.36: System performance as a function of their densities' ratio,  $\beta = \lambda_p / \lambda_M$ . a) Average percentage of users connected to macro/pico base stations. b) Average load for non-empty BSs. c) Average percentage of inactive users for macro/pico base stations. d) Average percent of users in Outage. e) Average DL/UL spectral efficiencies for AMC; f) Average DL/UL binary data rate for AMC.

### 5.3. EFFECTS OF SYSTEM DESIGN PARAMETERS ON SYSTEM PERFORMANCE

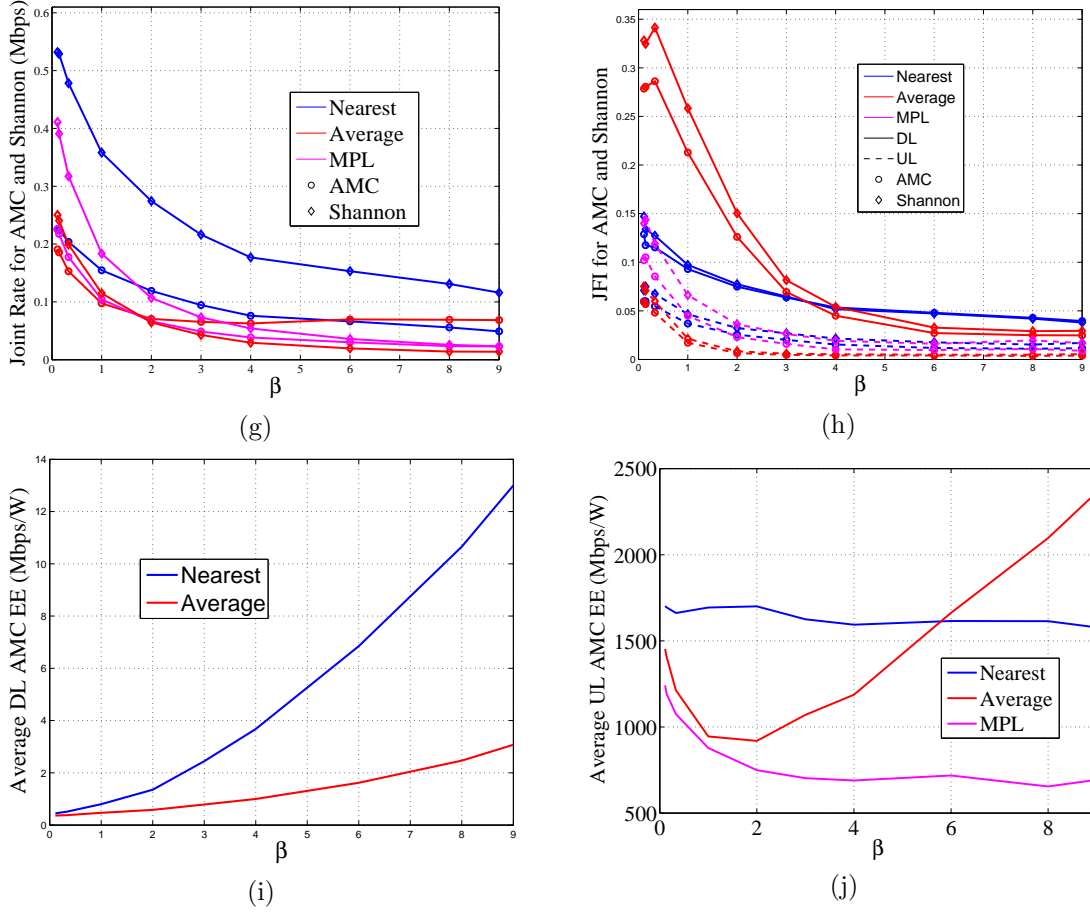


Figure 5.36: System performance as a function of their densities' ratio,  $\beta = \lambda_p/\lambda_M$ . g) Joint rate for AMC and Shannon limit. h) Jain's index for marginal rates (AMC and Shannon limit) i) Average DL energy efficiency for AMC. j) Average UL energy efficiency for AMC.

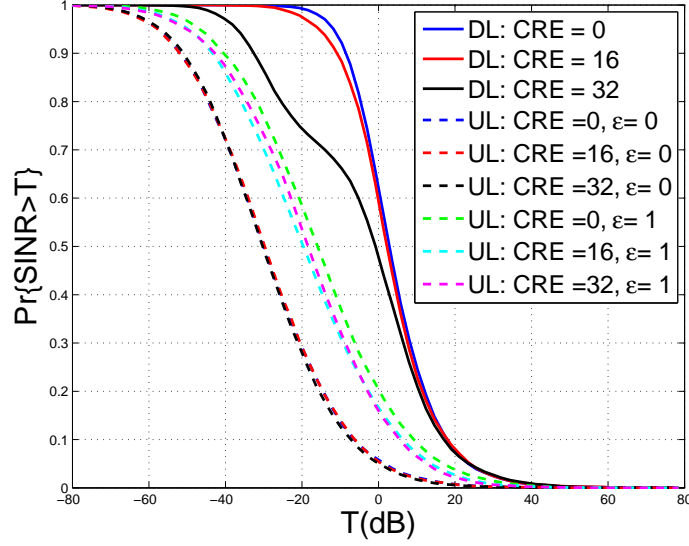


Figure 5.37: Impact on marginal uplink and downlink coverage probabilities for association criteria C2 with  $\tau = 0dB, 16dB$  and  $32dB$ .

when there are enough pico cells to offload users from macro BSs, average rate begins to grow (see Fig. 5.36(e) and Fig. 5.36(f)). In general, the spectral efficiency and binary rate are dwindling on the basis that pico cells are transmitting lower power, and although they are closer to their associated users, power they receive is worse and interferers are closer. Moreover, a similar reason explains the performance observed for MPL association. Average joint rate is declining and also users are treated in a more unfair way (see Fig. 5.36(h) for Jain's index).

Fig. 5.36(i) and Fig. 5.36(j) show the results of DL and UL EE respectively as the function of  $\beta$ . Generally,  $EE^D$  under C1 and C2 criteria is improving as more users are linking themselves to pico tier with increase in  $\beta$ .  $EE^U$  is declining in C1 and C3 and is improving in C2 and this behaviour of  $EE^U$  is in correspondence to the binary rate under all association criteria.

Results regarding the effect of cell range expansion bias are now shown. Range expansion is applied as a form to offload users from macro to pico tier when users are associated to the BS strongly received (C2 association). Backhaul throughput

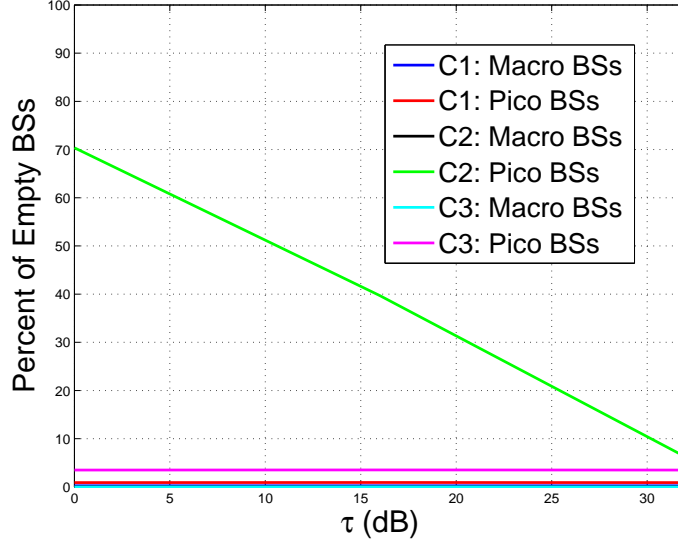


Figure 5.38: Percentage of empty macro and pico BSs under C1, C2 and C3 criteria with  $\tau = 0dB$ ,  $16dB$  and  $32dB$ .

limits or maximum number of users due to signaling are not addressed for these results. As shown in Fig. 5.37, DL coverage is reducing with the increase in pico cell expansion. For  $\tau = 32$  dB, almost all pico BSs are non empty (see Fig. 5.38), thus the number of interfering BSs has increased with  $\tau$ . Similarly the offloaded users from their respective macro BSs also face strongest interference besides lower intended power in the downlink and, consequently, DL coverage reduces. This interference phenomenon can be minimized using interference management techniques such as enhanced Inter-Cell Interference Coordination (eICIC) and further enhanced Inter-Cell Interference Coordination (feICIC) or carrier based intercell interference coordination which are the time/frequency domain techniques.

In the uplink, coverage  $P_c^U$  is also reducing with higher CRE. By increasing  $\tau$ , the number of interfering UEs grow and users associated with biased pico BSs transmit with higher power as well because they are farther from their desired BSs, producing high interference in uplink particularly at higher values of  $\epsilon$ . It should also be noted that by rising  $\tau$ , 40% of UEs have been offloaded from macro to pico tier and almost

all BSs are non empty. Interference aware power control can improve UL performance.

The impact on system measurements of applying cell range expansion to C2 criteria in order to offload users from macro to pico tier is shown in Fig. 5.39. Results for C1 and C3 criteria are also shown as constants for comparison. Regarding system parameters other than default, specific  $\tau$  values change with different user density ratio  $\gamma$  and active users limit  $N_{max}$  but qualitative performance for other pairs of values is similar.

Usually the aim of range expansion is to share users equally between the tiers. From  $\tau = 0$  (no range expansion), any increase in bias offloads users from macro to pico BSs. If path losses were identical, range expansion forcing equal user sharing would be the difference between power plus antenna gain,  $35dB$ . Different path losses slightly modify the value to  $\tau \approx 39dB$ . With the increase of  $\tau$ , spectral efficiency reduces as more and more users located at the edge of pico cells are associated to them and become outage users as shown in Fig. 5.39(d). As more users are associated to the more dense pico BSs, the average user load ( $A^l$ ) dramatically decreases. As a result, data rate in DL increases. Users begin to be treated in a more fair way although soon (above  $30dB$ ), Jain's index begins to decrease. As  $\tau$  (CRE) is  $50dB$  and above, spectral efficiency is too low (half the value for  $\tau = 0$ ) while load is not decreasing as already most of the users are associated to pico cells (80%). Such a high bias forces users to get associated to pico BSs to which they have too bad quality channel. As a result, rate begins to decrease after  $64dB$  bias. Regarding UL, in general the effect of range expansion is getting users closer to their associated BSs. However, there is not a clear increase in rate. EE improves both in UL and DL with rise in CRE bias ( $\tau$ ) as the users are offloaded from macro to pico tier. This effect is shown in Fig. 5.39(i) and Fig. 5.39(j) respectively.

### 5.3. EFFECTS OF SYSTEM DESIGN PARAMETERS ON SYSTEM PERFORMANCE

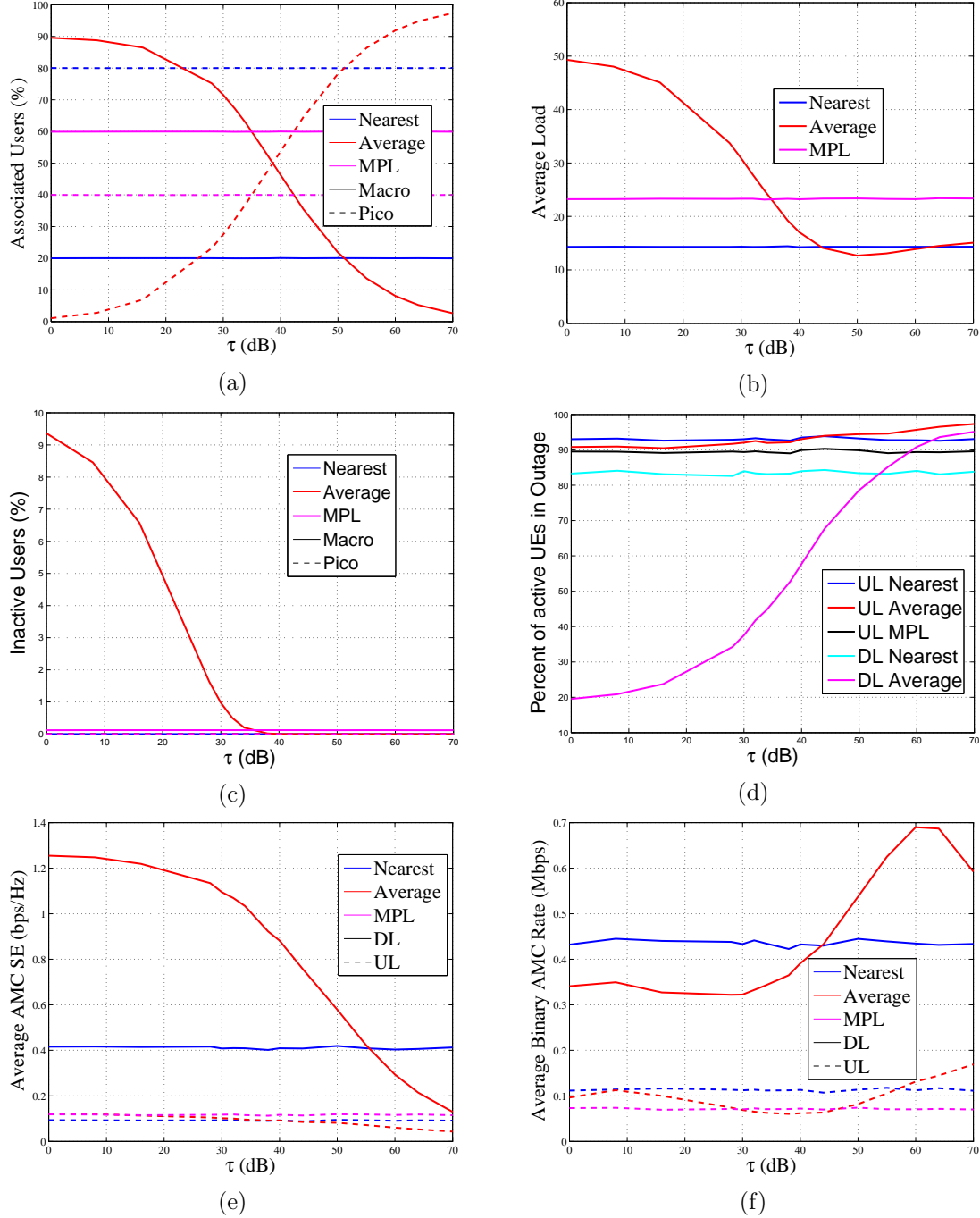


Figure 5.39: System performance as a function of pico range expansion bias,  $\tau$ . a) Average percentage of users connected to macro/pico base stations. b) Average load for non-empty BSs. c) Average percentage of inactive users for macro/pico base stations. d) Average percent of users in Outage. e) Average DL/UL spectral efficiencies for AMC. f) Average DL/UL binary data rate for AMC.

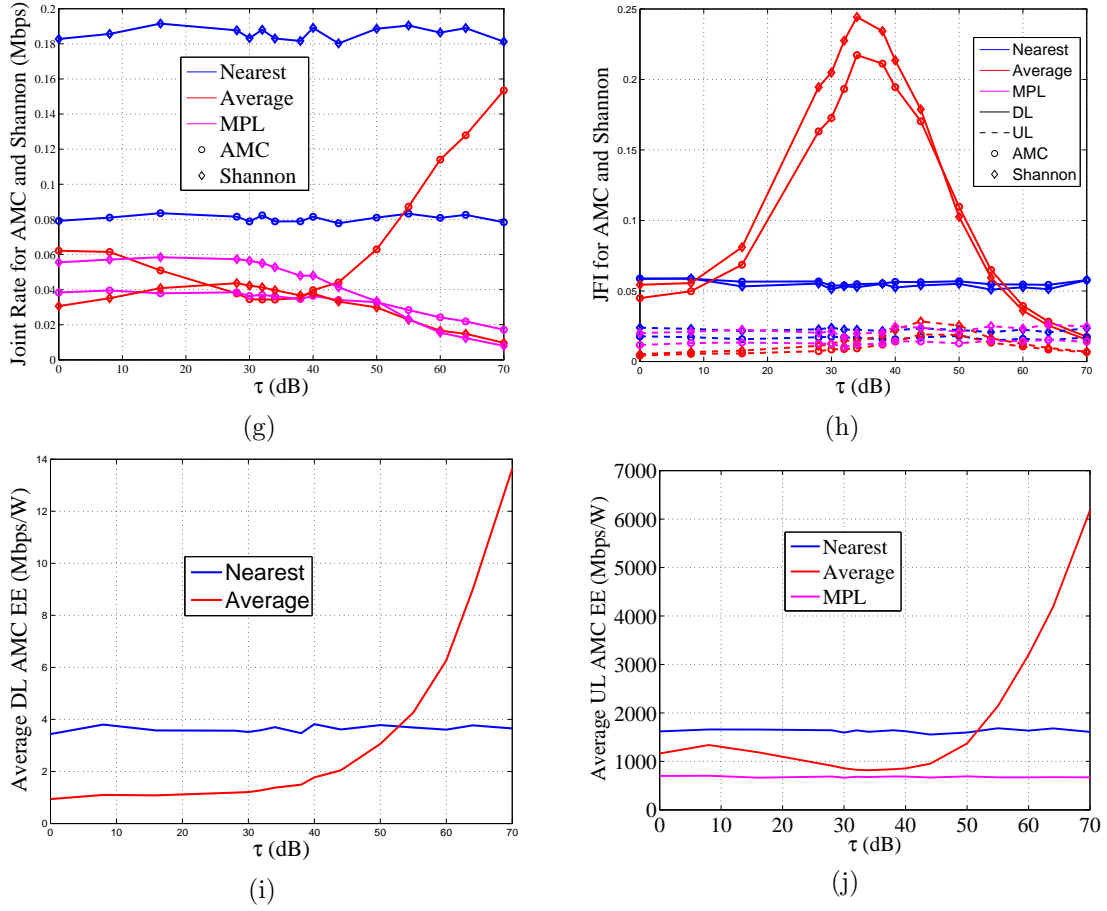


Figure 5.39: System performance as a function of pico range expansion bias,  $\tau$ . g) Joint rate for AMC and Shannon limit. h) Jain's index for marginal rates (AMC and Shannon limit). i) Average DL energy efficiency for AMC. j) Average UL energy efficiency for AMC.

### 5.3. EFFECTS OF SYSTEM DESIGN PARAMETERS ON SYSTEM PERFORMANCE

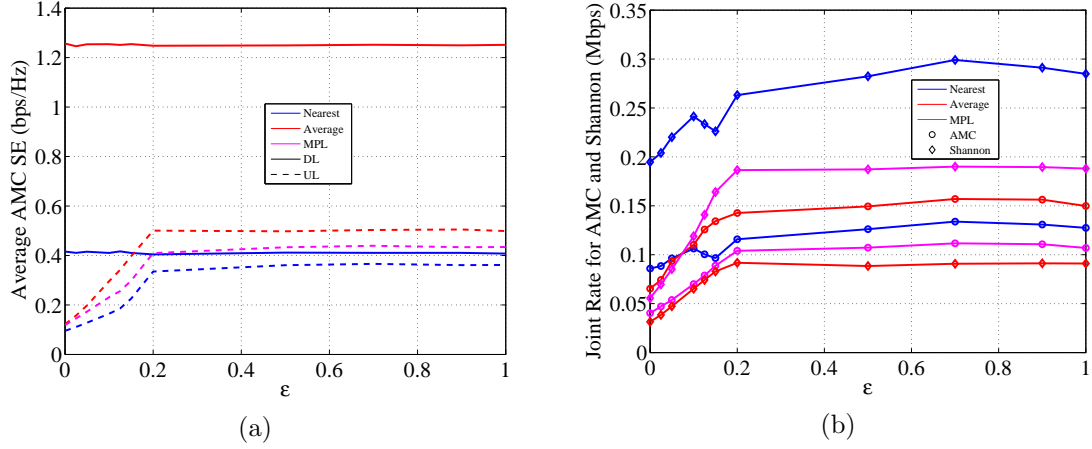


Figure 5.40: System performance as a function of power control index,  $\epsilon$  and no range expansion  $\tau = 0$ . a) Spectral efficiency for AMC. (Results for DL, not a function of  $\epsilon$ , shown as reference.) b) Joint average rate for AMC and Shannon limit.

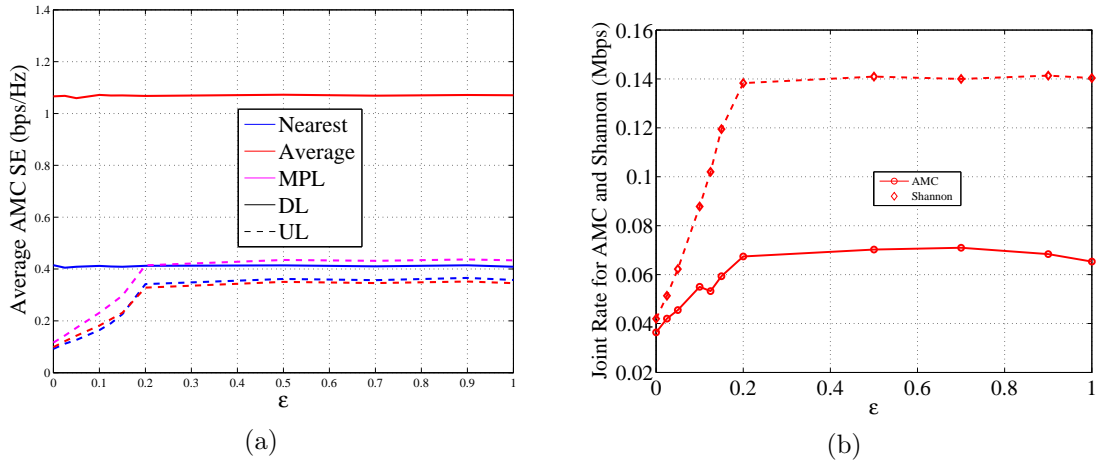


Figure 5.41: System performance as a function of power control index,  $\epsilon$  and range expansion bias  $\tau = 32$ . a) Spectral efficiency for AMC. (Results for DL, not a function of  $\epsilon$ , shown as reference.) b) Joint average rate for AMC and Shannon limit.



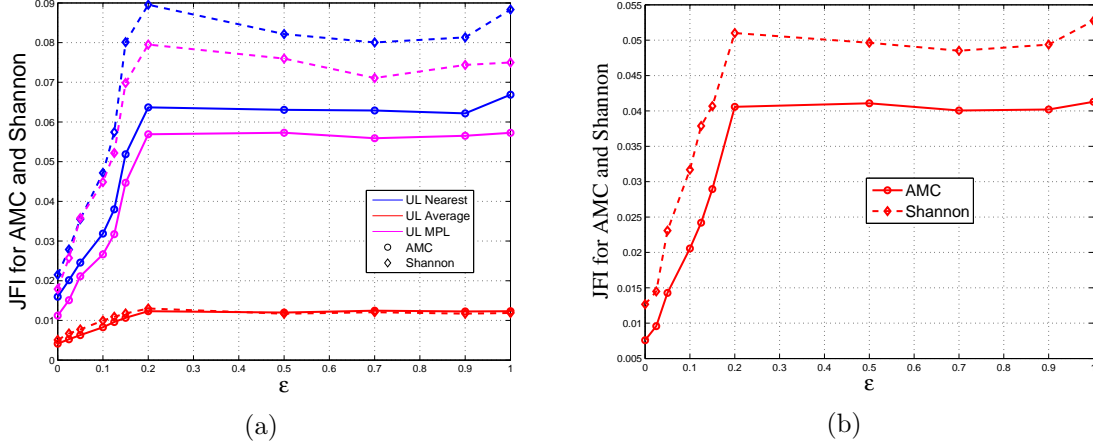


Figure 5.42: Jain's index as a function of power control index,  $\epsilon$ . a)  $\tau = 0dB$  (no range expansion). b)  $\tau = 32dB$ . (Only average criteria results are shown.)

### 5.3.3 UL fractional power control parameters

In this section, the effect of fractional power control index  $\epsilon$  is evaluated. The results about the effect of  $\epsilon$  on coverage has already been discussed in section 5.2.1. Fig. 5.40 shows the average spectral efficiency and the joint binary data rate for the three association criteria considered in this work. As joint rate has been considered as the minimum binary rate of both uplink and downlink, its result is always lower than marginal UL rate. Improvement in rate from  $\epsilon = 0$  to  $\epsilon = 0.2$  and  $\tau = 0dB$  to  $32dB$  is quite clear as visible from the results in Fig. 5.40 and Fig. 5.41. Further increase of power control index does not improve the performance as for most of the users, the maximum transmission power  $P_{max}$  is reached.

Regarding fairness, Fig. 5.42 shows Jain's index for UL rate as a function of  $\epsilon$ . Two different bias,  $\tau = 0$  dB and  $\tau = 32$  dB, have been considered. Without range expansion, treatment given by criteria C2 (UL coupled to DL maximum received power) is poor compared to nearest or minimum path losses. However, its performance improves if 32 dB power biasing is added to pico cells (Fig. 5.42(b)) to reach similar values to that of C1 and C3 criteria. Users associated with biased pico BSs transmit

### 5.3. EFFECTS OF SYSTEM DESIGN PARAMETERS ON SYSTEM PERFORMANCE

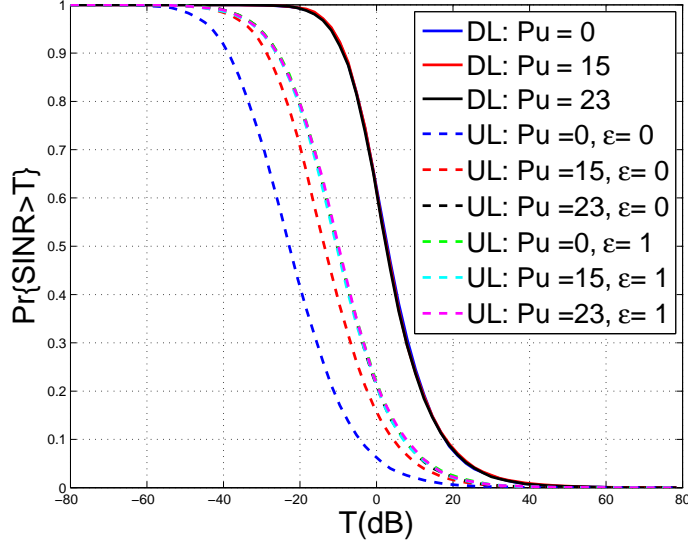


Figure 5.43: Impact on marginal uplink coverage probability for association criteria C3 with  $P_u = 0\text{dBm}$ ,  $15\text{dBm}$  and  $23\text{dBm}$ .

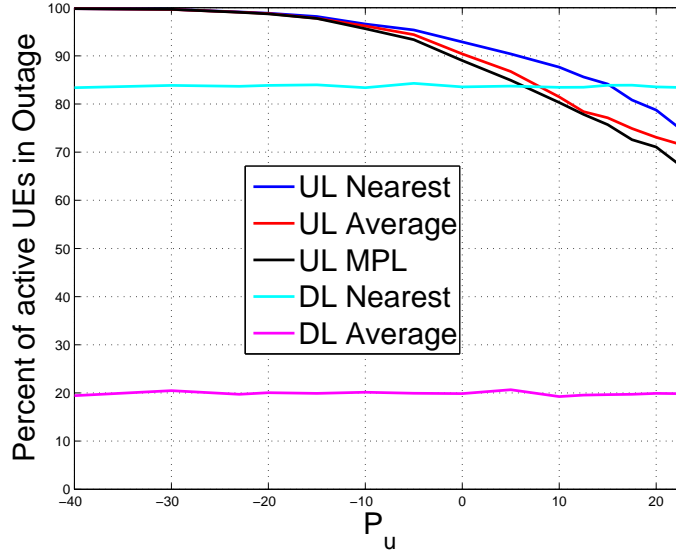


Figure 5.44: Average percent of users in outage with growing  $P_u$ .

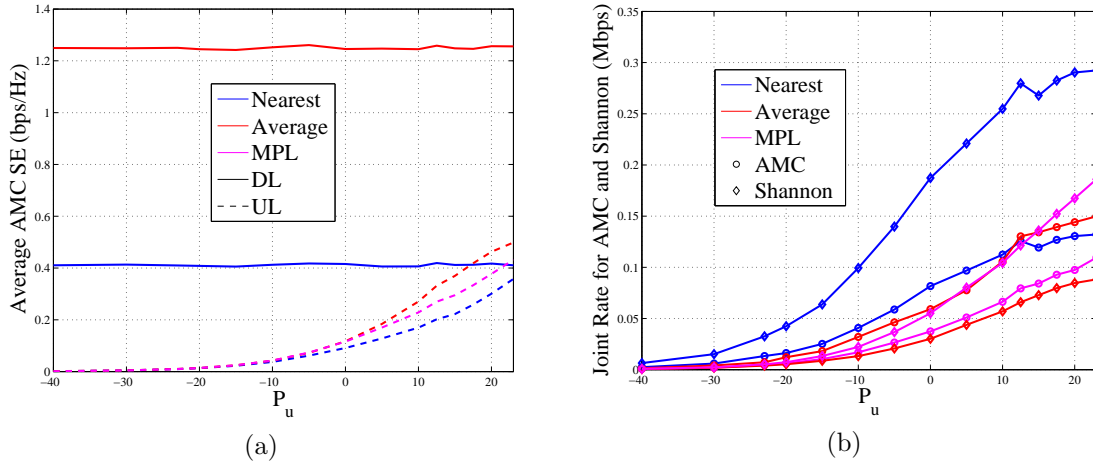


Figure 5.45: System performance as a function of open loop user transmission power,  $P_u$  and no power control. a) Spectral efficiency for AMC. (Results for DL are shown for comparison.) b) Joint rate for AMC and Shannon limit.

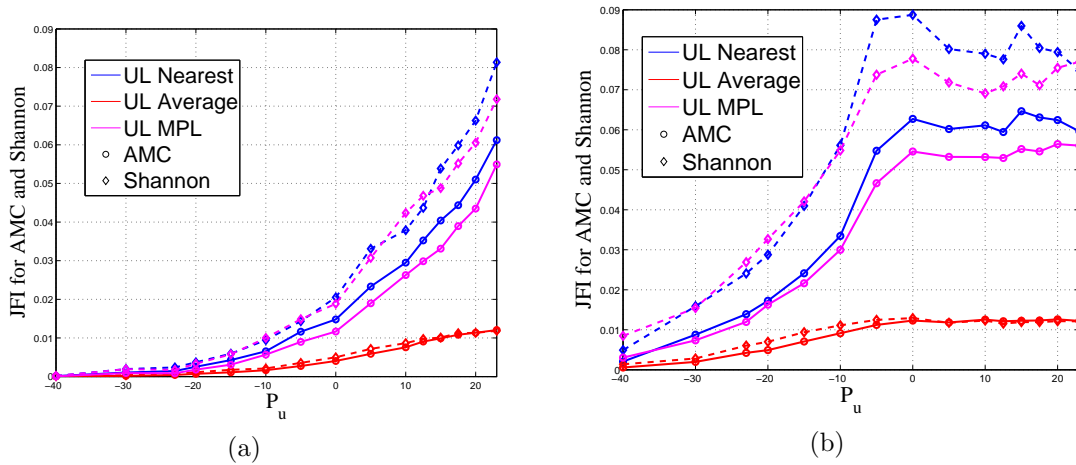


Figure 5.46: Jain's index as a function of of open loop user transmission power,  $P_u$ . a)  $\epsilon = 0$  (no power control). b)  $\epsilon = 0.2$ .

with higher power because they are farther from their desired BSs, producing high interference in uplink (particularly at higher values of  $\epsilon$  if maximum power were not limited).

Previous results were analyzed with transmission power  $P_u = 0 \text{ dBm}$ . Now, we are evaluating the effect of  $P_u$ . We always kept maximum user transmission power  $P_{max} = 23 \text{ dBm}$ . UL coverage  $P_c^U$  improves with the increase in open loop transmission power  $P_u$  from  $0 \text{ dBm}$  to  $23 \text{ dBm}$  as with higher  $P_u$ , UEs intended power at their associated BSs is improving. When  $P_u = 23 \text{ dBm}$ , UL coverage is equivalent to the UL coverage obtained with  $\epsilon = 1$  under all association criteria because at  $\epsilon = 1$ , UEs transmit with maximum power of  $23 \text{ dBm}$ . Results regarding the effect of  $P_u$  on  $P_c^U$  under criteria C3 are shown in Fig. 5.43. There is an improvement in spectral efficiency as users' intended power at their associated BSs improve and users come out of outage as shown in Fig. 5.44. Results in Fig. 5.45 show that for  $\epsilon = 0$  (no power control), rate grows with  $P_u$  upto  $P_{max}$  is reached.

Regarding fairness, all criteria obtain better results as transmission power grows (see Fig. 5.46). Using power control (Fig. 5.46(b)), Jain's index for a lower transmission power has improved.

# Chapter 6

## Conclusions

### 6.1 Summary

In this doctoral thesis, various performance indicators of heterogeneous cellular networks have been analyzed under diverse coupling and association criteria. The performance indicators which have been studied include joint uplink/downlink SINR distribution along with marginal uplink and downlink distributions, symmetric spectral efficiency, symmetric binary rate (in average and its Jain Index), fairness, and energy efficiency.

We considered a two-tier heterogeneous cellular network with macro and pico BSs and UEs uniformly distributed. Realistic path loss models given by 3GPP have been taken into account for both macro and pico tiers. In this work, three association criteria were used to associate users to macro or a pico tier. The association criteria which were investigated include the coupled and decoupled association criteria. The coupled association criteria encompass nearest BS (C1) and maximum downlink average power (C2) whereas in decoupled association criteria, users were associated in DL by maximum average receive power and in UL by minimum path loss (C3).

In contrast to homogeneous networks, heterogeneous networks have unbalanced

load under maximum downlink average receive power criteria because of the difference in transmission power of the tiers. In order to balance the load between the tiers of a two-tier heterogeneous network, Cell Range Expansion (CRE) was taken into account. Another technique known as Fractional Power Control (FPC) which compensates the path losses of the users towards their associated BSs was included. Since the association strategy has a bearing on the statistics of distance, the influence of association criteria on FPC has been analyzed.

Initially, numerical results for marginal and joint uplink/downlink SINR distributions were evaluated, considering the coupled and decoupled association criteria. Later, we focused on the analysis and performance of the symmetrical spectral efficiency which simultaneously satisfies both uplink and downlink requirements using adaptive modulation and code by considering realistic thresholds from an LTE link simulator. The results showed a remarkable lack of independence and correlation between uplink and downlink coverage has been guessed even under independent Rayleigh fading. The assumption of independence between both up and down links was analyzed for the complex trade-off of the parameters for network design to obtain the best symmetric spectral efficiency. It was found that overall better symmetric spectral efficiency under C2 criteria with partial fractional power control. Moreover, associating the user to the BS received with stronger average power in the DL and minimum path loss in UL (C3) and by using partial fractional power control leads to the highest symmetric spectral efficiency coverage only for lower values of spectral efficiency.

We later presented simulation results for coverage and various other performance measures under a set of diverse system parameters mentioned in Table 5.1 to get insights about the impact of variation of each parameter on system performance. Simulation results showed that taking into account limits on the maximum spectral efficiency and on the number of simultaneous active users within a cell strongly

modified results on joint binary rate. Spectral efficiency of DL binary rate is not necessarily higher for C2 than that of nearest criteria as the maximum load per cell is easily reached for loaded networks and many macro users get inactive. If this is selected as an association criteria, cell range expansion biasing is advisable.

Other parameters of the network have also been studied, such as the average number of users per cell. It has been investigated that lowering  $\gamma = \frac{\lambda_u}{\lambda_{BS}}$ , i.e., deploying a denser infrastructure by increasing the total number of BSs, not only improves coverage and average rates but also the energy efficiency and fairness. A reduction of  $\gamma$  from 10 to 5 slightly increases coverage, average joint rate and energy efficiency but the improvement in fairness is noticeable as Jains index is multiplied by 20. Coverage and average joint rate does not improve and energy efficiency reduces because more users are allocated resources as  $N_{max}$  grows, although treatment is more fair as less users are kept with no rate at all.

It has been inspected that including more picocells (while keeping the total number of BSs) has no worth for average rate and fairness under average criteria mainly due to the high difference of power between both tiers but energy efficiency slightly improves as more users get inactive. Coverage also reduces with addition of more picocells (increase in  $\beta$ ) because more users are associated to pico tier where they experience higher path loss. Cell range expansion bias ( $\tau$ ) utilized in C2 criteria reduces coverage but fairness is maximum for its mid range values and the energy efficiency as well as the binary rate has improved much beyond those mid range values.

Finally, slight increment in fractional power control ( $\epsilon$ ) from 0 to 0.2 improves coverage and joint rate and also provides better user fairness treatment. Moreover, for realistic 3GPP path loss models, it seems that decoupled DL/UL association does not improve results enough to be worthwhile. Conclusively, for a limit in the active users per cell  $N_{max} = 30$ , best results for the considered system model are obtained when the average number of users in the system is 5 times that of BSs ( $\gamma = 5$ ),

while there are 4 times picocells compared to macrocells ( $\beta = 4$ ), power control is fractional with index  $\epsilon = 0.2$ , open loop power for the UEs i.e.,  $P_u = 0dBm$ , and range extension bias in the range  $32 \leq \tau \leq 64$  is employed under average association criteria.

## 6.2 Future research directions

This dissertation has highlighted the performance of heterogeneous cellular networks under diverse coupling and association criteria. Considering the complexity of these networks, a huge research is on going in heterogeneous cellular networks. This final section introduces some promising directions for future research and exploration which are listed below.

- In this dissertation, we have considered three association criteria: nearest, average in DL and coupled UL, and average in DL and minimum path loss (MPL) in uplink to analyze the performance of heterogeneous cellular networks. However, another association criteria may be considered for future work where the choice of serving BS is made based on the instantaneous received signal power. This forces a dynamic selection of cell [43] that will be possible through intensive communication between cells.
- To improve the performance of wireless systems, Full Duplex (FD) mode [44] has been introduced where bidirectional communications occur on the same temporal and spectral resources. Our work is studied for heterogeneous cellular networks under the assumption of Half-Duplex (HD) mode. Performance of full-duplex heterogeneous cellular networks under coupled and decoupled cell association criteria could be an area for future exploration.
- We have assumed that the resources are shared equally among the active set of



users associated to a specific BS which is known as equal resource partitioning based scheduling. Similarly it has also been assumed that all queues for downlink and uplink transmission are saturated (full buffer), that is, each BS and UE always has data to transmit. Although these assumptions make the analysis easy and effective to get insights but may not be realistic. Considering the queuing dynamics at each BS along with scheduling could be the new research direction to be explored in future work.

- The impact of power control mechanism which compensates the path losses between UEs and BSs in uplink, known as fractional power control, has been investigated under this work. We have neglected the power control mechanism in downlink as in current networks only small changes in power allocated to users can be done. A further analysis in this area will be of interest.
- Downlink power setting is also an important feature to be studied. In this case, constant power is used by each BS. However, that power is not the same for all BSs in one layer but it is possibly different for each BS to prevent the excessive use of power in the downlink and to avoid interference problems to the neighboring cells, improving the system performance.
- To minimize the loss of data, acknowledgments (ACKs) are necessary which are provided on backhaul transport links in wireless networks. For decoupled association, these acknowledgments are received with certain delay as they have to be transmitted from the BS associated in the uplink to that in downlink. The impact of these acknowledgement delays or feedback delay impact has not been taken into account in our work. This delay or latency has remarkable effect on system performance which can be addressed in future and may have an interesting outcome under this proposed research.

## 6.2. *FUTURE RESEARCH DIRECTIONS*

---

# Appendix A

## Resumen en español

### A.1 Introducción

#### A.1.1 Motivación

Las redes celulares heterogéneas (Heterogeneous Cellular Network, HCN) [1], [2], [3] surgen de la combinación de celdas pequeñas con macroceldas existentes. El propósito del despliegue de HCNs es satisfacer la demanda de tráfico de datos inalámbricos que surge del desarrollo de gran cantidad de aplicaciones móviles. La forma más fácil de mejorar la capacidad y la cobertura es agregar más espectro para satisfacer el crecimiento esperado en el tráfico de datos. Desafortunadamente esta no es la solución rentable y la única manera de mejorar la capacidad y cobertura es densificar la red macrocelular existente mediante la adición de celdas pequeñas. Las celdas pequeñas son nodos de baja potencia de diferentes tipos que incluyen microceldas, picoceldas y femtoceldas. Cada capa de la red contiene todos los elementos de un cierto tipo, que transmiten con la misma potencia.

La asociación de los usuarios a las celdas en la red heterogénea puede realizarse de acuerdo a criterios variados [4], [5], [6], [7]. Puede hacerse a la celda más cercana en distancia física o puede emplearse la distancia radioeléctrica, es decir, las pérdidas

de propagación. Como las potencias empleadas son diferentes, un criterio habitual es asociar el equipo de usuario (User Equipment, UE) a la estación base que se reciba con mayor potencia generalmente media pero que podría ser instantánea si la red permite selección dinámica de celda.

La asociación por potencia hace que las zonas que cubren las distintas capas sean muy diferentes. Eso hace que finalmente la mayor parte de los usuarios se asocien a macroceldas, lo que genera desequilibrios en el reparto. Una técnica bastante extendida para repartir los usuarios es la expansión del rango de la celda (Cell Range Expansion, CRE) [8], [9], [10], [11]. Básicamente, a la potencia recibida desde la picocelda se le añade un sesgo de manera que se amplía su zona de cobertura. Obviamente, los usuarios en esta zona expandida reciben peor calidad pero también deben repartir los recursos de la celda con menos usuarios competidores.

En cuanto al enlace ascendente, las celdas en funcionamiento actualmente siempre asocian ambos enlaces a la misma celda. Hay que tener en cuenta que aunque la comunicación sea sólo unidireccional, existe la necesidad de retroalimentar cierta información de estado del canal o para la codificación de canal. En los últimos años se está planteando la posibilidad de desacoplar ambas asociaciones [5], [6], [7] al permitir la arquitectura de la red intercambios rápidos de información entre BSs, sobre todo si la red radio se implementa en la nube (Cloud Radio Access Network, C-RAN).

La adición de celdas pequeñas transforma la red tradicional en una red densa compleja y difícil de evaluar con los métodos tradicionales de la teoría de la comunicación. La geometría estocástica juega un papel importante para superar este problema. Se trata de una herramienta que permite analizar el comportamiento promedio de la red sobre muchas realizaciones espaciales donde los nodos están distribuidos siguiendo alguna distribución de probabilidad [17].

Se puede encontrar en la literatura un amplio conjunto de trabajos teóricos sobre la

transmisión de enlace descendente (DownLink, DL) mediante la geometría estocástica [18]. La mayoría de los investigadores se centran en la evaluación de la relación señal a interferente (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR). Entre los diversos parámetros que se estudian, se analizan con asiduidad los criterios de asociación. Se han analizado con éxito varios como la asociación a la celda de la que se recibe con mayor potencia instantánea [4], con mayor potencia media [19] o a la BS más cercana [20].

Se puede encontrar un grupo reducido de trabajos para el enlace ascendente (UpLink, UL). La asociación en ocasiones se ha hecho forzada por el enlace descendente (acoplada) [16] mientras en otros se ha permitido que los enlaces ascendente y descendente comuniquen con BSs distintas (desacoplado) [21]. Los resultados teóricos se obtienen comúnmente a través de un modelo modificado por el cual los UEs siguen una distribución uniforme pero no así las estaciones base [13]. Este modelo no es válido para el enlace descendente.

En el análisis del enlace ascendente, es necesario tener en cuenta el uso habitual del control de potencia para que distintos usuarios asociados a la misma estación base se reciban con niveles similares de potencia. Este mecanismo se tiene en cuenta en trabajos previos [12],[13], [14], [15], [16] pero suponer que la potencia del equipo de usuario es ilimitada es habitual [12], a pesar de los límites legales a los niveles de potencia de salida [22].

Sólo un conjunto limitado de trabajos incluyen la eficiencia espectral como indicador del rendimiento de la red. Habitualmente el análisis se realiza con el límite superior de Shannon, que es una función invertible monotónicamente creciente de la SINR. Sin embargo, en un sistema real el mecanismo empleado sería la modulación y codificación adaptativa (Adaptive Modulation and Code, AMC). Aunque se pueden encontrar trabajos que consideran AMC en lugar de la eficiencia espectral de Shannon [23], sus efectos sobre el sesgo para la expansión del rango de celda óptimo y sobre

el control de potencia no se han desvelado aún. Además, es necesario un estudio de cómo esta eficiencia se traduce en tasa binaria de transmisión a través del reparto de los recursos de la celda entre los usuarios. Hasta ahora, el análisis de tasa binaria se ha basado en la aproximación de carga media, es decir, se utiliza la carga media de usuarios por BS en lugar de la carga real [7].

La comunicación humana, recibida a través de los sentidos físicos, es a menudo un servicio simétrico. En algunas aplicaciones como voz, redes sociales o videollamadas, el tráfico originado es simétrico y la misma calidad mínima debe mantenerse a ambos lados de la comunicación. Otras aplicaciones, como el almacenamiento en nube, son intensivas en el enlace ascendente mientras otras aplicaciones destacadas, como la transmisión de vídeo, el tráfico de enlace descendente es extremadamente alto comparado con la transmisión de enlace ascendente y sólo se necesita cierta retroalimentación para la comunicación. Sin embargo, incluso en estos casos, se necesita una calidad mínimo en el enlace ascendente para fines de señalización (por ejemplo, reconocimientos y medidas de calidad). El usuario puede no obtener la calidad de servicio (Quality of Service, QoS) requerida de la red incluso si es capaz de decodificar la transmisión en enlace descendente pero no puede conectarse a través de enlace ascendente.

A pesar de ser crítico para entender el funcionamiento de la red, se pueden encontrar menos trabajos que estudian el rendimiento conjunto de la red en ambos enlaces descendente y ascendente. A veces se toman asunciones como la independencia entre las interferencias en el UL y el DL [26] sin suficiente justificación [9]. La distribución de la tasa de Shannon en toda la red se deriva en ocasiones bajo la suposición de independencia entre las SNIRs y las cargas en las estaciones base de los enlaces ascendente y descendente [12], lo cual es engañoso ya que la densidad de usuarios y de estaciones base influye en ambos.

En esta tesis, se simula una red celular heterogénea de dos niveles con estaciones

base (BS) de macro y picocelda y equipos de usuario (UE) uniformemente distribuidos y formando cada uno un proceso de punto de poisson (Poisson Point Process, PPP) uniforme. Se estudian dos criterios de asociación para el enlace descendente, a la BS más cercana y a la BS con la señal media más fuerte. El enlace ascendente puede acoplarse a él o asociarse independientemente a la BS a la que las pérdidas del camino son mínimas. La distribución conjunta de la SINR en los enlaces ascendente y descendente en la red celular heterogénea de dos niveles se obtiene mediante el método de Montecarlo considerando el modelo 3GPP [27], [28]. Se ha estudiado el impacto de la densidad de usuarios y del reparto de la infraestructura entre macro y picoceldas. Se ha tenido en cuenta el efecto del control de potencia en el enlace ascendente y el sesgo de CRE. Se obtienen las tasas binarias tanto marginales (UL/DL) como simétrica (UL y DL simultáneamente) usando modulación adaptativa con umbrales realistas de un simulador LTE disponible en [29]. Se estudia si los beneficios de desacoplamiento compensan su complejidad arquitectónica. El efecto del control de potencia así como los límites de la señalización sobre el número de usuarios activos simultáneamente en de una celda se analiza para todas las estrategias de asociación. Además de evaluar los valores promedio, también se abordan los efectos de los criterios de asociación, el control de potencia y el sesgo sobre la equidad entre usuarios.

### A.1.2 Contribuciones de la tesis

Las contribuciones de esta tesis son las siguientes:

- Se obtiene la probabilidad de éxito de transmisión (Transmission Success Probability, TSP) como la probabilidad de que la SINR de ambos enlaces ascendente y descendente sea mayor que el cierto umbral y se explora la suposición de independencia entre SINRs marginales.
- Se obtiene la eficiencia espectral simétrica usando modulación adaptativa con

umbrales realistas de un modelo de simulador de enlace LTE.

- Se estudia la tasa de datos conjunta de los enlaces ascendente y descendente o tasa binaria simétrica que puede alcanzarse con las eficiencias espectrales realistas indicadas.
- Además de la eficiencia espectral simétrica y la tasa binaria, la justicia y la eficiencia energética se analizan en función de diversos parámetros del sistema bajo varios criterios de acoplamiento y asociación.

### A.1.3 Esquema de la tesis

El resto del resumen en español de la tesis se desarrolla como sigue:

La section A.2 proporciona una visión general de las redes celulares heterogéneas. También discuten los procesos de punto de Poisson y su importancia en el análisis de las redes celulares heterogéneas.

En la section A.3, teniendo en cuenta la exactitud y tratabilidad de los modelos de red PPP, se presenta una red celular de dos niveles donde el nivel 1 y el nivel 2 están formados por BS macro y picoceldas, respectivamente. También se discuten criterios de asociación de usuarios a celdas para los enlaces descendente y ascendente. Además, se discuten las técnicas de expansión de rango y control de potencia fraccionario.

En la section A.4, se describen varios indicadores de rendimiento del sistema y se explican los resultados numéricos obtenidos.

Finalmente, la section A.6 proporciona conclusiones y líneas futuras de trabajo.

### A.1.4 Publicaciones relacionadas

- M. M. Shaikh, M. C. Aguayo-Torres, "Joint Uplink/Downlink Coverage and Spectral Efficiency in Heterogeneous Cellular Network," Springer Wireless



Personal Communications Journal, vol. 91, no. 2, November, 2016, DOI 10.1007/s11277-016-3889-1.

- M. M. Shaikh, M. C. Aguayo-Torres, "Fairness and Rate Coverage of Symmetric Transmission over Heterogeneous Cellular Networks under Diverse Coupling and Association Criteria," Springer Wireless Personal Communications Journal (Under review).

## A.2 Visión de conjunto de las redes celulares heterogéneas y los procesos punto de Poisson

Las demandas de tráfico de datos inalámbricos están creciendo enormemente debido a aplicaciones móviles como las redes sociales, los contenidos de video y aquellos basados en la nube que son hoy parte necesaria de la vida cotidiana. También requerimos que estas aplicaciones no presenten problemas, sean rápidas, estables y económicas. Atender las demandas de banda ancha móvil de una sociedad que ha entrado en una era de grandes datos sólo es posible con una capacidad y cobertura muy amplia. Esto ha obligado a los operadores de red a repensar cómo mejorar sus redes bajo el principio de mayor capacidad y mejor cobertura a costos reducidos y consumo de energía reducido [1].

Pueden obtenerse mayor capacidad y mejor cobertura mediante el uso de más espectro o aumentando la densidad de la red. El espectro es limitado y costoso y, por lo tanto, la única solución para mantener la experiencia del usuario con continuos aumentos en el tráfico parece ser la densificación de la red. Es posible lograr mayor capacidad en redes heredadas mediante el despliegue de celdas pequeñas en las zonas de cobertura de las macroceldas donde se presentan demandas de tráfico altas. Estas celdas están equipadas con los nodos de energía baja que podrían ser de interior o al

aire libre. Además de la capacidad, la implementación de celdas pequeñas permite también abordar el tema de precio y energía [1]. Como consecuencia, de la demanda de tráfico de datos ha surgido una migración desde una red móvil homogénea a una arquitectura de red heterogénea, que ha sido adoptada por muchos operadores de redes inalámbricas.

### **A.2.1 Redes celulares heterogéneas**

La red macrocelda por sí sola no puede alcanzar la capacidad y cobertura requeridas específicamente en las áreas de alta densidad de tráfico en interiores o exteriores como centros urbanos, aeropuertos y centros comerciales. Así, la red de pequeñas celdas con estaciones base de baja potencia juega un papel importante en la cobertura futura y en la capacidad cuando se combina con la red macrocelular existente. Dicha red se denomina red celular heterogénea (Heterogeneous Cellular Network, HCN). Diferentes tipos de redes heterogéneas pueden desarrollarse agregando diferentes tipos de celdas pequeñas con una red de macroceldas según la capacidad, cobertura y necesidades requeridas por los clientes.

Las celdas se clasifican según su tamaño que viene determinado básicamente por la potencia que transmiten.

El sistema de antenas distribuidas (Distributed Antenna System, DAS) es una colección de nodos conectados a una unidad de transceptor de banda base centralizada a través de un cable de fibra óptica para proporcionar cobertura de red celular en las áreas de señal débil o sin señal, o en áreas como estaciones subterráneas, hospitales, universidades, aeropuertos y centros de convenciones. Las microceldas tienen menor cobertura que la red macrocelular. Las micro estaciones base hacen el mismo procesado que el resto pero con una potencia de transmisión inferior en 5-10 W. Pueden coordinarse con la macro red a través de la interfaz X2 en la Red de Acceso de Radio Terrestre Universal Evolucionada (E-UTRAN ) [2]. Las picoceldas transmiten

con una potencia pequeña, típicamente de 250 mW a 2 W aproximadamente. Su cobertura es aproximadamente 200 metros, más pequeña que las estaciones base macrocelulares y microcelulares. También se coordinan con la red macrocelular a través de la interfaz X2 en E-UTRAN. Por su parte, las femtoceldas son estaciones base de consumo de energía muy baja y, habitualmente, es necesario suscribirse para acceder a ellas, es decir, forman un grupo cerrado de abonados. Su potencia de transmisión típica es de 100 mW.

### **A.2.2 Aspectos clave y desafíos en las redes celulares heterogéneas actuales**

Hay muchos aspectos que distinguen la red celular heterogénea de la red móvil homogénea. Es intuitivo que la red celular heterogénea tiene mejor cobertura y capacidad que las redes heredadas, pero por otro lado, al agregar las celdas pequeñas, se afrontan serios desafíos.

#### **Asociación a celda y balance de carga**

En redes celulares heterogéneas, el equipo de usuario (User Equipment, UE) está asociado a una estación base específica dependiendo de una regla que se denomina criterio de asociación. Se pueden considerar diferentes criterios de selección de la estación base como son la selección de estación base (Base Station, BS) más cercana o la potencia de recepción media máxima. En ocasiones, se realiza buscando descargar UEs de macroceldas hacia celdas pequeñas cargadas más ligeramente. Esto permite mejorar la velocidad de datos de los usuarios asociados a celdas pequeñas y proporcionar más recursos a los usuarios restantes asociados con las macroceldas.

### **Densificación de celdas pequeñas e interferencia intercelda**

La interferencia intercelular es otro desafío cuando la red se despliega con un gran número de nodos de baja potencia. Se han desarrollado numerosas técnicas en el dominio de frecuencia y del tiempo para mitigarla. Por ejemplo, una celda silencia algunas subtramas para disminuir la interferencia a las celdas cercanas. La transmisión y recepción multipunto coordinada (CoMP) es otra tecnología para aliviar la interferencia intercelular mediante la cooperación entre las macroceldas y las celdas pequeñas.

### **Redes autoorganizadas**

Con la densificación de la red celular con estaciones base de baja potencia, surge el reto de configurar los parámetros de las estaciones base. En una pequeña red macrocelular, los parámetros de la estación base se configuraron manualmente, pero esto no es posible en una red heterogénea densa. Es necesario en una red heterogénea que los nodos puedan auto organizarse para facilitar la operación y el mantenimiento de la red. De este modo, las redes autoorganizadas (Self-Organizing Networks, SON) son el conjunto de funcionalidades de las estaciones base que permiten organizarse para simplificar el funcionamiento y mantenimiento de la red. Las tres amplias categorías de funcionalidades de SON son: autoconfiguración, auto-optimización y auto-curación. SON también incluye aspectos para controlar la interferencia.

### **Traspasos**

El uso de diferentes tipos de celdas pequeñas pueden crear problemas si se aplican las mismas reglas de traspaso habituales entre celdas de una red homogénea. Por ejemplo, los UEs que se mueven a velocidades altas están asociados a macroceldas para evitar traspasos frecuentes entre celdas pequeñas.

### **Eficiencia energética**

A pesar de que la adición de un gran número de células pequeñas permite a los UEs acercarse a la infraestructura de red y prolongar la vida de la batería, por otro lado, la huella de carbono global de la red aumenta. Para solucionar este problema, los nodos deben consumir la mínima energía cuando se encuentran inactivos y ser eficientes cuando están activos.

### **A.2.3 Algunos aspectos en las redes celulares heterogéneas futuras**

Se están llevando a cabo gran cantidad de trabajos para dar paso de las redes celulares de cuarta generación (4G) de hoy a las redes de la quinta generación (5G). Algunas de las tecnologías clave que proporcionan un camino hacia 5G se discuten a continuación.

### **Red de acceso radio en la nube**

En las redes celulares tradicionales, todas las estaciones base se despliegan individualmente con recursos propios para el acceso al núcleo de red, sistemas de suministro eléctrico, aire acondicionado, seguridad, etc. Esta arquitectura tiene algunas limitaciones como el coste de cada estación base, la necesidad de coordinación de interferencias y el desperdicio de recursos debido a la fluctuación del tráfico. Teniendo en cuenta estas limitaciones, se está introduciendo la red de acceso radio en la nube (Cloud RAN, Cloud Radio Access Network), compuesta de elementos sin inteligencia denominados Cabezas de Radio Remotas (Remote Radio Heads, RRHs) distribuidas en el área operativa y conectadas a la Unidad de Banda Base centralizada (Base Band Unit, BBU) a través de una fibra de baja latencia. La Cloud RAN es similar al DAS discutido anteriormente, pero con mayor área operacional y funciones.

### **Comunicaciones en la banda de milimétricas y MIMO masivo**

Existe gran cantidad de espectro inactivo en el rango de las ondas milimétrica (30-300 GHz) y varios gigahertzios disponibles en el rango de 20-30 GHz [30]. Sin embargo, la cobertura se reduce debido a las altas pérdidas del camino, por lo que sólo se podrían emplear estaciones base pequeñas. Además, se presentan otros problemas de propagación como el bloqueo del camino, la absorción atmosférica y por la lluvia y cómo asociar UEs y estaciones base con un haz estrecho. El uso de técnicas masivas con múltiples antenas (Massive Multiple Input Multiple Output, Massive MIMO) es una solución clave para abordar algunas de las cuestiones relacionadas con las comunicaciones en la banda de milimétricas. Se emplean un gran número de antenas que mejoran la eficiencia espectral, reducen la interferencia debida a la radiación estrecha hacia el UE objetivo y proporcionan un entorno de propagación favorable para reducir las pérdidas del camino. Varios temas como la estimación de canal o la contaminación de los pilotos están aún bajo investigación.

### **Procesos de punto de Poisson**

El elemento fundamental de la geometría es un punto. En la naturaleza, encontramos muchos patrones puntuales distribuidos espacialmente al azar. Esta colección aleatoria de puntos en algún espacio se llama proceso puntual. El estudio de estos patrones espaciales aleatorios se denomina geometría estocástica. En muchos campos de estudios como la silvicultura, la epidemiología, la geografía, etc., la geometría estocástica juega un papel importante en el análisis matemático. Del mismo modo, en el campo de la comunicación inalámbrica, la geometría estocástica ha recibido atención, ya que la ubicación de los nodos o los usuarios puede considerarse como puntos aleatorios. Uno de los modelos básicos, simple e importante para la aleatoriedad espacial es el proceso de punto de Poisson (Poisson Point Process, PPP). Si se trata de una distribución que reparte puntos en un espacio delimitado con

intensidad constante en todo el volumen del conjunto, entonces se trata de una PPP homogénea. La figura A.1 muestra una realización del proceso de punto de Poisson [4] con intensidad ( $\lambda = 100$ ).

El análisis de las redes celulares en tecnologías anteriores se ha llevado a cabo habitualmente considerando las estaciones base situadas en un patrón hexagonal. Sin embargo, si se consideran ubicaciones de los diferentes tipos de estaciones base de una red celular heterogénea en un área de  $1Km^2$ , no se puede observar ningún patrón determinístico. Puede recurrirse al uso de modelos estocásticos como los procesos de punto de Poisson para modelar tales redes complejas. El uso de celdas heterogéneas no sólo ha transformado las redes sino que las ha hecho complejas de analizar debido a las siguientes razones. (i) En lugar de la relación señal-ruido (Signal to Noise Ratio, SNR), la relación señal-interferencia más ruido (SINR) es el factor limitante del rendimiento. (ii) Las pérdidas del camino y el desvanecimiento dependen de la geometría de la red y, a su vez, la interferencia depende de ellas. (iii) En redes grandes, es imposible para cada nodo anticipar las ubicaciones y canales de todos los demás nodos [17]. La geometría estocástica juega un papel importante para analizar el comportamiento promedio de la red sobre muchas realizaciones espaciales para las que los nodos están distribuidos aleatoriamente [17].

### A.3 Modelo de sistema y criterios de asociación

Se pueden utilizar varios criterios para asociar los equipos de usuario a una estación base macro o pico. En las redes actuales, sólo son posibles asociaciones en las que el UE está emparejado con la misma BS para la transmisión tanto de enlace ascendente como de enlace descendente, lo que se denomina asociación acoplada. En redes homogéneas, formadas por un solo nivel y donde todas las BS transmiten con la misma potencia, los criterios de asociación como el BS del cual la potencia media recibida

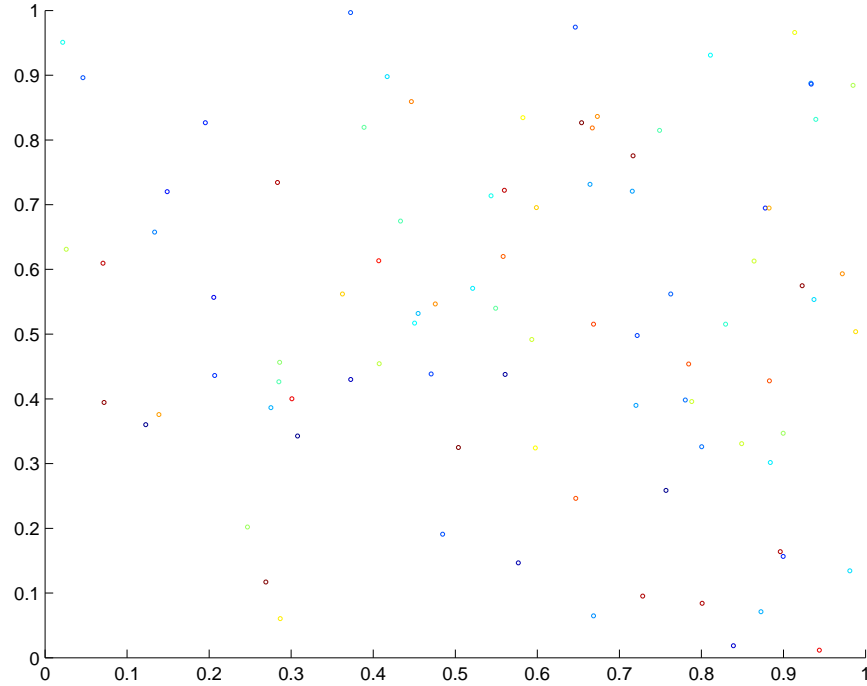


Figure A.1: Realización de un proceso de punto de Poisson con  $\lambda = 100$

en el enlace descendente es máxima es también el de la potencia máxima recibida en el enlace ascendente ya que los canales en el enlace descendente y ascendente son casi recíprocos en términos de sombreado y pérdidas del camino. Sin embargo, la cobertura de enlace ascendente sería mayor en una red heterogénea si la estación base a la que se asocia un usuario se seleccionara de forma independiente al enlace descendente [5]. El desacoplamiento de los enlaces ascendente y descendente sólo será posible cuando se resuelvan el problema de permitir un camino a la información de señalización desde el usuario hacia la red. Esta posibilidad se está convirtiendo en viable según avanza el desarrollo de 5G y de la red de acceso de radio en la nube [6].

El control de potencia fraccional (Fractional Power Control, FPC) y la expansión del rango de celda (Cell Range Expansion, CRE) son dos técnicas ampliamente empleadas en las redes heterogéneas celulares para mejorar su rendimiento. La técnica de control de potencia fraccional se emplea normalmente para compensar



parcialmente las pérdidas del camino debidas a la distancia entre el UE y BS. Dado que las estrategias de asociación tienen relación con las estadísticas de distancia, el control de potencia está fuertemente influenciado por los criterios de asociación. Por su parte, la expansión de rango de celda permite descargar el tráfico de las macroceldas mediante un aumento artificial (bias) de la medida de potencia del enlace descendente de las celdas pequeñas. Como resultado, los UE reasignados se encuentran más cerca de las estaciones base a las que se hallan asociados lo que mejora el comportamiento del enlace ascendente.

En este capítulo, se describe el modelo del sistema analizado junto con los escenarios de implementación y el modelo de canal. Además, se explican la extensión del rango de las celdas, los criterios de asociación de usuarios en enlace ascendente y enlace descendente estudiados y el control de potencia fraccional.

### A.3.1 Modelo de sistema

Un despliegue de una red celular heterogénea de dos niveles se muestra en la Fig. A.2. El nivel 1 se compone de las estaciones base de macrocelda con potencia de transmisión fija de  $P_1$  y el nivel 2 está formado por BSs de picocelda con potencia de transmisión fija de  $P_2 < P_1$ . Las ubicaciones de las estaciones base son modeladas por procesos de punto de Poisson homogéneos e independientes denotados por  $\Phi_k$  con intensidad  $\lambda_k$ , donde  $k = 1$  representa las BS de macrocelda y  $k = 2$  significa BSs de picocelda. El proceso generado global según el teorema de superposición es también una PPP homogénea con  $\Phi_{BS} = \Phi_1 \cup \Phi_2$  con intensidad  $\lambda_{BS} = \lambda_1 + \lambda_2$ . Denotaremos la relación de BS de picocelda en comparación con la BS de macrocelda como  $\beta$ , es decir,  $\beta = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ . Todas las BSs dentro de un nivel transmiten con la misma potencia constante  $P_k$ .

Los usuarios son modelados por otra PPP  $\Phi_u$  homogénea independiente con intensidad  $\lambda_u$ . Denotamos la relación de densidad de usuario en comparación con

la densidad de BS total como  $\gamma$ , es decir,  $\gamma = \frac{\lambda_u}{\lambda_{BS}}$ . Todos los equipos de usuario tienen una potencia de transmisión  $P_u$  que puede ser modificada por el control de potencia fraccionario para compensar parcialmente las pérdidas de trayecto a las BS a las que están asociados.

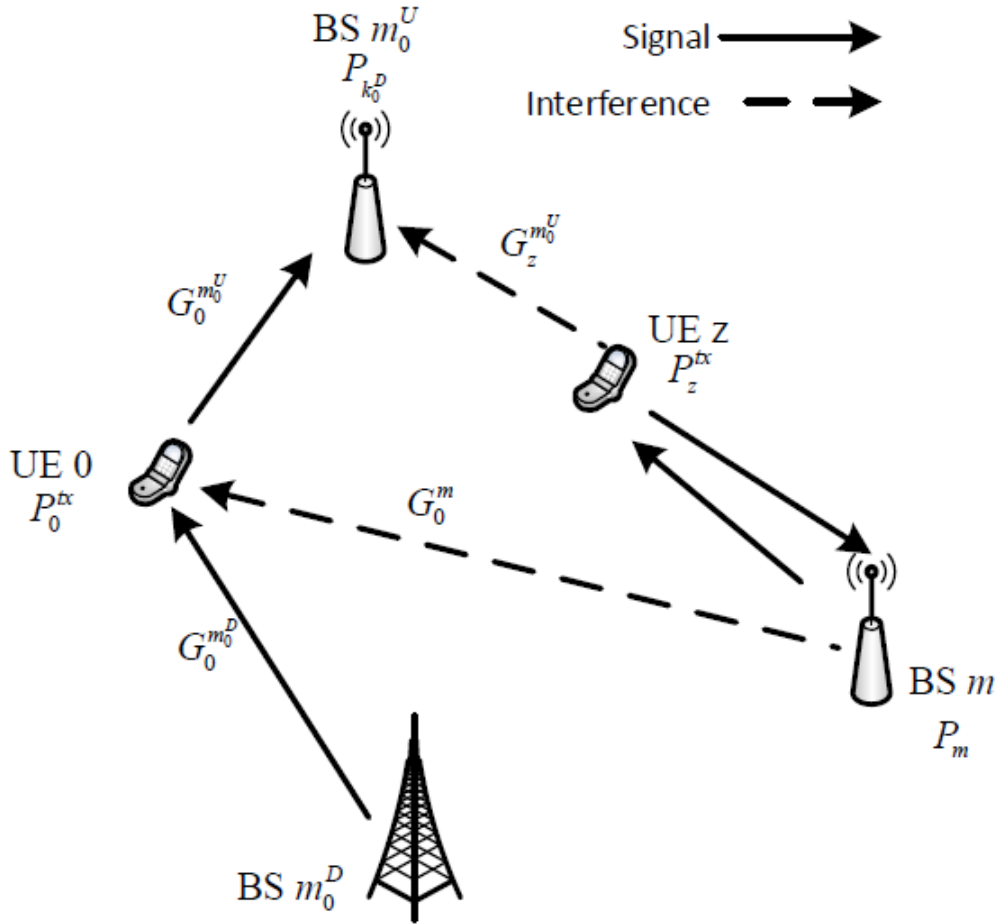


Figure A.2: Modelo de sistema que muestra la asociación desacoplada para el usuario  $z$ . Las señales que interfieren con dicho usuario también se muestran.

### Modelo de canal

Las pérdidas del camino entre un usuario  $z$  y cierta estación base BS  $m$  en la capa- $k$ , situada a una distancia  $d_z^m$  de ella, con las constantes adecuadas, pueden escribirse

como:

$$\frac{1}{K_k} (d_z^m)^{\alpha_k}, \quad (\text{A.3.1})$$

donde  $K_k$  es la pendiente de las pérdidas del camino y  $\alpha_k$  es el exponente de dichas pérdidas.

Además, se ha considerado el desvanecimiento a gran escala. Por lo tanto, las pérdidas de canal con sombras entre un UE  $z$  y un BS  $m$  vienen dadas por

$$L_z^m = \frac{1}{S_z^m} \frac{1}{K_k} (d_z^m)^{\alpha_k}, \quad (\text{A.3.2})$$

donde  $S_z^m$  es la realización aleatoria de la sombra log-normal entre el usuario y la BS cuyo promedio, denotado por  $\sigma_k$ , es diferente para cada capa. Denotamos  $d_z^m$  como la distancia entre el usuario  $z$  y la BS  $m$ . En este trabajo se ha considerado el modelo de canal 3GPP [27] y diferentes pendientes y exponentes de pérdida de trayecto, y se han tenido en cuenta los promedios de sombreado para cada capa. Con respecto al enlace ascendente, se han considerado pérdidas de trayectoria y sombras simétricas con el enlace descendente.

El desvanecimiento a pequeña escala de todos los enlaces del sistema se asumen independientes e idénticamente distribuidos según una distribución de Rayleigh. La atenuación del desvanecimiento en cualquier enlace  $l$  (DL o UL) de cualquier capa, y entre cualquier BS  $m$  y UE  $z$  se considera entonces distribuida exponencialmente con una media unitaria, es decir  $H_{z,m}^L \sim \exp(1)$ . Instantáneamente, la potencia recibida se atenúa y la ganancia de canal entre el UE  $z$  y el BS  $m$  en el enlace  $l$  viene dada por

$$H_{z,m}^l G_z^m, \quad G_z^m = S_z^m K_k (d_z^m)^{-\alpha_k} \quad (\text{A.3.3})$$

Para la asociación desacoplada, el usuario  $z$  recibe la señal deseada en el enlace descendente desde la estación base a la que se asocia  $m_z^D$  perteneciente al nivel  $k_z^D$  mientras envía la información en el enlace ascendente a una BS  $m_z^U$  posiblemente de diferente capa  $k_z^U$ . La descripción de cómo se selecciona la BS para cada usuario en

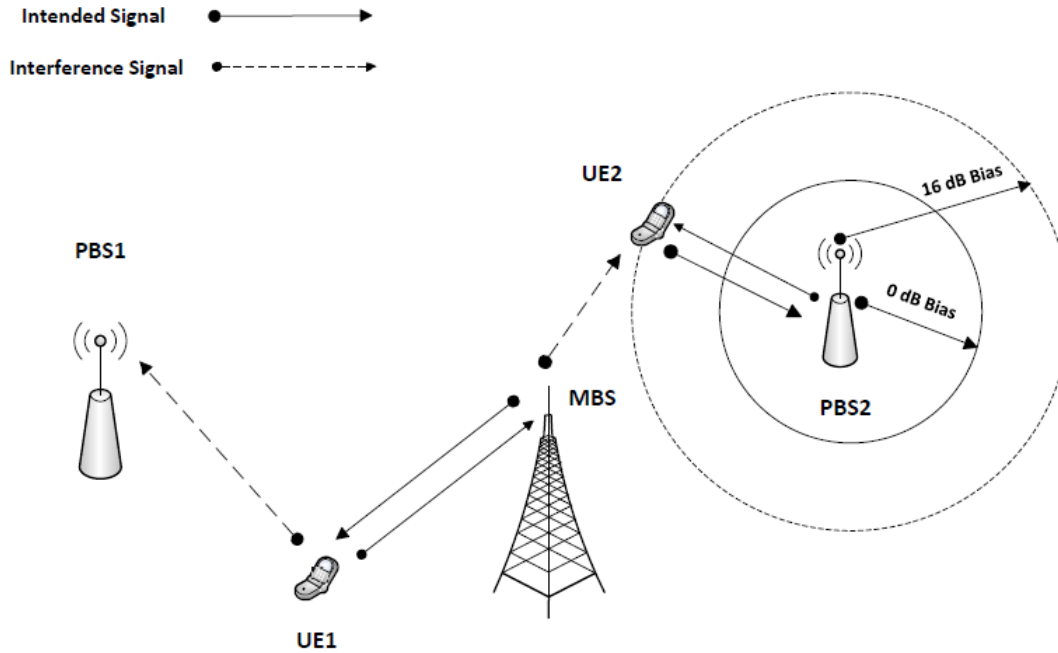


Figure A.3: Modelo de expansión de rango celular

ambos enlaces (DL y UL) se da en las subsecciones siguientes. Antes de describir estos criterios, se discute primero una técnica importante conocida como expansión de rango celular (Cell Range Expansion, CRE) que está relacionada con los criterios de asociación.

### Expansión del rango de celda

Los criterios de asociación tienen un fuerte impacto en la distribución de los usuarios entre las estaciones base. En la literatura, el número de usuarios asociados a una BS se denomina carga (load). En redes celulares homogéneas, todas las BS tienen una potencia de transmisión igual y de alguna manera un patrón regular. Por lo tanto, el número de usuarios asociados a cada BS es similar y, por lo general, la carga entre todos las BSs de la red está equilibrada. Sin embargo, en redes celulares heterogéneas, las estaciones base de las picoceldas transmiten con baja potencia en comparación

con las de las macroceldas. Debido a ello, con los criterios de asociación habituales de potencia máxima recibida media en el enlace descendente, habría más usuarios asociados a estaciones base macro que a estaciones base pico. Con el propósito de repartir la carga, el área de cobertura de las células pico se incrementa aumentando la potencia de transmisión de las BS de las celdas pequeñas con la adición de un sesgo  $\tau$  a la potencia de recepción promedio en lo que se conoce como expansión del rango de celda (Cell Range Expansion, CRE). El concepto de CRE se muestra en la Fig. A.3.

Inicialmente, con un sesgo  $\tau = 1(0dB)$ , el equipo de usuario 2 está conectado a la estación de macrocelda en el enlace descendente. Cuando se añade el sesgo, el usuario 2 es servido por la estación base de picocelda. Además de otras razones (como los límites de la red de retorno o backhaul), la expansión del rango genera ganancia debido a razones de señalización, ya que existe un número máximo de usuarios simultáneamente atendidos por una BS (30 en LTE con ancho de banda 10 MHz) cite 3GPPPhy. La probabilidad de que un usuario se vea obligado a mantenerse inactivo (incluso si no está en interrupción u outage), ya que no hay posibilidad de asignarle recursos de señalización, será menor con el sesgo apropiado. Por otra parte, está claro que cuantos más usuarios estén asociados a una BS específica, hay disponibles un porcentaje menor de recursos para cada uno. Por lo tanto, el impacto positivo de utilizar el concepto de extensión de alcance es el equilibrio de carga con el propósito de una distribución o utilización eficiente de los recursos. A cambio, los UE situados en la región de expansión experimentan una fuerte interferencia en el enlace descendente desde las BS macro. Esto también se muestra en la Fig. A.3 con línea punteada. Es decir, la CRE degrada la eficiencia espectral del enlace descendente para los usuarios descargados. Con respecto al enlace ascendente, la polarización de los UE hacia las células pequeñas mejora la SINR del enlace ascendente para asociaciones acopladas (ya que los UE descargados estarán probabilísticamente más cerca de su

BS pico asociado), y aumenta el porcentaje de recursos disponibles para ellos.

### A.3.2 Criterios de asociación en el enlace descendente

Se han analizado con éxito varios criterios de asociación, tales como el guiado por la máxima potencia instantánea recibida [4], la potencia sesgada recibida promedio máxima [19], y la estación base más cercana [20]. En esta tesis se consideran dos criterios de selección de estación base de servicio o reglas de asociación para la asociación de usuarios de enlace descendente denominadas como la asociación de BS más cercana y la asociación de BS promedio más fuerte. Ambos se detallan en esta subsección mientras que se proporciona más información sobre la asociación en el enlace ascendente en la siguiente subsección A.3.3.

#### Asociación a la estación base más cercana

La asociación a la estación base más cercana determina la BS asociada a cada usuario como la que está geográficamente más cercana. Esta asociación no depende del desvanecimiento, sino de las posiciones físicas. En las redes homogéneas, prácticamente esta regla de asociación se ajusta al escenario donde el usuario es estacionario en relación a la BS. En otras palabras, este criterio de asociación depende únicamente de la pérdida de trayectoria dada por la ecuación (A.3.1).

Las distancias de un equipo de usuario  $z \in \Phi_u$  a todo el conjunto de BSs las escribiremos como  $\{d_z^m, m \in \Phi_{BS}\}$  y el subconjunto de distancias a las BS en el nivel  $k$  se escriben como  $\{d_z^m, m \in \Phi_k\}$ . La BS a la que está asociado el usuario  $z$  en el enlace descendente se denomina  $m_z^D$  y por  $k_z^D$  el nivel al que pertenece la estación base asociada. Nombraremos como  $d_z^D = d_z^{m_z^D}$  a la distancia desde el UE  $z$  a su BS de servicio en el enlace descendente.

Como primer criterio, un usuario móvil se conecta a su BS más cercana, siendo la

BS seleccionada aquella que cumple:

$$m_z^D(N) = \arg \min_{m \in \{\Phi_{BS}\}} \{d_z^m\}. \quad (\text{A.3.4})$$

Esto es equivalente a dividir todo el espacio  $R^2$  en regiones de Voronoi [4]. Llamamos a este criterio de forma abreviada simplemente como criterio "más cercano".

### Asociación a la estación base más fuerte en promedio

En el criterio de asociación BS más fuerte (o más alto), un usuario móvil se conecta a la BS desde la cual el UE recibe la potencia media máxima en el enlace descendente. Además, esta potencia de recepción media máxima posiblemente está sesgada con el fin de descargar a los usuarios de macro a pico BSs. Teniendo en cuenta el mismo sesgo para todas las BS en un nivel, la BS candidata  $m_z^k$  de la capa  $k$  es la BS más cercana dentro de ese nivel del UE:

$$m_z^k = \arg \min_{m \in \{\Phi_k\}} \{d_z^m\}. \quad (\text{A.3.5})$$

La BS seleccionada bajo este criterio puede ser evaluada como la recibida con potencia media ponderada máxima:

$$m_z^D(A) = \arg \max_{m_z^k, k \in \{1,2\}} \left\{ \tau_k \cdot P_k S_z^{m_z^k} K_k \left( d_z^{m_z^k} \right)^{-\alpha_k} \right\} \quad (\text{A.3.6})$$

siendo  $k_z^D(A)$  el nivel al que pertenece la BS seleccionada bajo criterios de potencia media. En este caso, la BS asociada no es necesariamente la BS más cercana del UE, aunque el espacio entero siga estando dividido en regiones esta vez de Voronoi ponderadas, cuya distribución de tamaños depende básicamente de la relación entre los productos de la potencia de transmisión  $P_k$  y el sesgo de expansión de rango  $\tau_k$  ( $\tau_k \cdot P_k$ ). A lo largo de este trabajo, el sesgo para las BS de macrocelda se considerará la unidad  $\tau_1 = 1$  mientras se denominará simplemente  $\tau = \tau_2$  al sesgo para las BS de pico. Nos referiremos a este criterio como criterio "promedio".

En lo que sigue  $d_z^D$  denominará la distancia desde un usuario  $z$  a su BS asociada en el enlace descendente,  $m_z^D$ . En ambos modelos de asociación, la potencia media recibida por el usuario de su BS asociada puede escribirse entonces como:

$$P_z^D = P_{k_z^D} S_z^{m_z^D} K_{k_z^D} (d_z^D)^{-\alpha_{k_z^D}}. \quad (\text{A.3.7})$$

Respecto al número de usuarios asociados a una BS, bajo estos criterios de asociación es posible que una BS no tenga usuarios asignado en la DL, lo que resulta más probable para densidades de usuario bajas. En ese caso, los recursos no se utilizan. Por otra parte, el número de usuarios asociados a una BS específica no tiene límite superior, ya que, después de condicionar al tamaño de la celda, puede escribirse como una distribución de Poisson [4]. Como se describe más adelante, consideraremos que como mucho  $N_{max}$  usuarios son atendidos simultáneamente por la BS mientras que los usuarios no seleccionados (si los hay) se consideran inactivos.

### A.3.3 Criterios de asociación en el enlace ascendente

En este trabajo se han considerado asociaciones de usuarios acopladas y desacopladas. Como se describe en el documento [6], puede hablarse de cinco ventajas del desacoplamiento de UL y DL. (i) mejora en la SINR del enlace ascendente, (ii) mejora en la interferencia mejorada, (iii) mejora en la velocidad de transmisión de datos, (iv) equilibrio de carga en UL y DL, y (v) menores costes de despliegue de la red por la centralización de la red de acceso radio. Estas ventajas de rendimiento de red, cobertura y bajo consumo de energía sólo es posible alcanzarlas con grandes cambios arquitectónicos en las actuales redes móviles LTE-A.

Nombraremos como  $d_z^U$  a la distancia desde un usuario  $z$  a su BS asociada en el enlace ascendente,  $m_z^U$ , sea esta la misma o distinta de la asociada en el enlace descendente.

En el caso de enlace ascendente acoplado al enlace descendente, se asocia un enlace



Table A.1: Resumen de criterios de asociación.

No	BS asociada (DL,UL)	Asociación en DL	Asociación en UL
C1)	$m_z^D(N) = m_z^U(N)$	Más cercana	Más cercana
C2)	$m_z^D(A) \rightarrow m_z^U(A)$	Potencia promedio sesgada	Acoplada
C3)	$m_z^D(A), m_z^U(M)$	Potencia promedio sesgada	Pérdidas del camino mínimas

ascendente activo con cada usuario activo asociado a una BS en el enlace descendente, es decir,  $m_z^U = m_z^D$ . En este caso, los criterios de asociación en el DL influyen enormemente en el rendimiento del enlace ascendente. En el caso de asociación a la celda más cercana, la BS asociada en el DL es también la más cercana para el enlace ascendente. Sin embargo, para la máxima potencia recibida en promedio, el área de cobertura de las macro celdas es mayor (ya que  $P_1 > P_2$ ) y los UE tienden a estar más alejados de la BS de servicio.

Si se considera la asociación desacoplada, se decide la BS asociada a una transmisión para el enlace ascendente bajo criterios independientes del enlace descendente. Esto significaría que  $m_z^U$  puede ser diferente de  $m_z^D$  con cierta probabilidad [21]. Se ha evaluado un solo criterio para el UL, el de pérdidas en el camino mínimas. La BS candidata para cada nivel es la BS más cercana dentro de ese nivel del UE, como en (A.3.5), y la BS asociada es aquella que maximiza la ganancia de canal:

$$m_z^U(M) = \arg \max_{m_z^k, k \in \{1,2\}} \left\{ S_z^{m_z^k} K_k \left( d_z^{m_z^k} \right)^{-\alpha_k} \right\}. \quad (\text{A.3.8})$$

Este criterio de pérdidas en el camino mínimas (Minimum Path Loss, MPL) es equivalente a maximizar la potencia recibida media en la BS si no se considerara control de potencia para el equipo de usuario. El resultado es posible que sea diferente del criterio de potencia promedio en el DL ya que se transmite diferente potencia en cada capa de red. Así, incluso bajo las mismas constantes  $\alpha_k$  y  $K_k$  para las pérdidas del camino, se recibirán dos valores de potencia diferentes a la misma distancia. Este

no es el caso para el enlace ascendente.

La tabla A.1 es un resumen de las asociaciones estudiadas en este trabajo. Para el primer criterio de asociación C1, la estación base asociada (dada por la ecuación (A.3.4)) es la misma en ambos enlaces, ascendente y descendente, como la estación base más cercana. Para la asociación de potencia máxima ponderada recibida en el enlace descendente (ecuación (A.3.6)), denominada como “media”, se han estudiado dos asociaciones diferentes para el enlace ascendente. La BS asociada en el DL también se toma como BS asociada en UL en el criterio de asociación C2. Esto se muestra como una flecha “ $\rightarrow$ ” en la tabla. Para el criterio desacoplado, por el contrario, la asociación en el UL se decide de manera independiente como la pérdida de trayectoria mínima sombreada (A.3.8)) (criterio de asociación C3).

#### A.3.4 Control de potencia fraccional

A medida que los usuarios situados en los bordes de la celda sufren más interferencia así como menor potencia de señal deseada, la velocidad de transmisión alcanzable será menor para ellos en comparación con la de los usuarios ubicados cerca de su BS asociada. En un intento por alcanzar un reparto de recursos más justo, el uso del control de potencia fraccional (Fractional Power Control, FPC) en el enlace ascendente compensa parcialmente las pérdidas y los desvanecimientos a gran escala (sombreado) en el camino del UE a la BS a costa de una mayor interferencia [12]. Además, una restricción de potencia es especialmente importante tanto para el mantenimiento de las baterías como sobre todo para los límites de seguridad [22]. A consecuencia del control de potencia, la potencia transmitida por el UE es muy variable y la potencia de interferencia no sólo depende de la distancia a la BS interferida, sino también de la distancia de cada UE a su BS asociada. Dado que la estrategia de la asociación tiene una relación con las estadísticas de las distancias entre UE y su BS asociada, el rendimiento del control de potencia está influenciado

por ella.

Bajo control de potencia fraccional, el equipo de usuario modifica la potencia transmitida para compensar parcialmente las pérdidas del camino hacia la BS asociada en el enlace ascendente. Además, se ha tenido en cuenta la existencia de potencia máxima transmitida por el UE,  $P_{max}$ . Nombrando como  $\epsilon \in [0, 1]$  el factor de control de potencia, la potencia transmitida por el UE  $z$  viene dada por:

$$P_z^{tx} = \min\{P_u (L_z^U)^\epsilon, P_{max}\}, \quad (\text{A.3.9})$$

siendo  $P_u$  la potencia de bucle abierto del UE y  $L_z^U = L_z^{m_z^U}$  las pérdidas del camino del UE a su BS asociada. Resulta claro de la ecuación (A.3.2) que la potencia deseada recibida en su BS tiene un término en la forma  $(d_z^U)^{(1-\epsilon)\alpha_{k_z^U}}$  que se convierte en la unidad si  $(d_z^U)^{(1-\epsilon)\alpha_{k_z^U}}$ , es decir, si la potencia recibida se fija a  $P_u$ . Por otra parte, la interferencia producida en otras BS  $m$  distintas de la deseada por el usuario  $z$  probablemente aumentará como:

$$I_z = P_z^{tx} (L_z^m)^{-1}. \quad (\text{A.3.10})$$

En sistemas celulares prácticos como LTE, los parámetros de control de potencia fraccional son específicos de la red (y no son específicos del usuario). La selección adecuada de  $\epsilon$  debe proporcionar un resultado aceptable para la mayoría de los usuarios, mientras consigue al mismo tiempo del sistema en su conjunto una capacidad total.

## A.4 Indicadores de rendimiento

En esta sección, se discuten varias métricas de rendimiento para analizar las redes celulares heterogéneas. La métrica general más básica e importante en las redes celulares es la probabilidad de cobertura, que fácilmente puede emplearse para

calcular otros indicadores. Se discute tanto la probabilidad marginal de cobertura del enlace descendente como la probabilidad de cobertura del enlace ascendente, así como la probabilidad de cobertura conjunta.

Como se describe en la Fig. A.2, elegimos aleatoriamente un UE específico del PPP  $\Phi_{UE}$  para el análisis y lo denominamos Usuario 0, siendo  $m_0^D$  la BS a la que se asocia en DL y  $m_0^U$  la BS a la que se asocia en UL. En la Fig. A.2, se ha presentado una asociación desacoplada para DL y UL, de manera que el usuario  $w$  ha seleccionado BS  $m$  para ambos enlace mientras que el usuario 0 se ha asociado a la macro BS  $m_0^D$  en el enlace descendente y a la pico BS  $m_0^U$  en el enlace ascendente. La potencia de transmisión de enlace ascendente se calcula para todos los UE utilizando la ecuación (A.3.9).

Hemos considerado la asignación ortogonal de recursos tanto en enlace ascendente como en enlace descendente. Con esta suposición, ninguna interferencia proviene de la BS a la que está asociado el usuario analizado. Además, si una BS tiene más de un usuario asociado, sólo uno de ellos se selecciona aleatoriamente como interferente. El conjunto de móviles que interfieren en el UL se denomina  $U$ , y el de BS interferentes en el DL como  $D$ .

### A.4.1 Cobertura de SINR

La probabilidad de cobertura de SINR o simplemente probabilidad de cobertura es la función de distribución acumulativa complementaria (Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF) de la SINR, que matemáticamente puede expresarse como:

$$P_c = P[SINR > T], \quad (A.4.1)$$

donde la relación señal a interferencia y ruido (Signal to Interference and Noise Ratio, SINR) en el enlace descendente puede escribirse como [31], [4]:

$$SINR^D = \frac{P_{k_0^D} G_0^{m_0^D} H_{0,m_0^D}^D}{N_0 + \sum_{m \in D} P_m G_0^m H_{0,m}^D}. \quad (\text{A.4.2})$$

En la expresión,  $G_0^m$  es la ganancia del canal de la BS  $m$  hacia el usuario analizado y  $H_{0,m}^D$  la potencia de desvanecimiento en el enlace descendente de la misma ruta.  $m_0^D$  es la BS específica asociada al usuario 0 en el DL, que le envía la señal deseada denotada como  $P_{k_0^D}$ .

En cuanto al enlace ascendente, se evalúa la SINR desde el mismo usuario hacia la BS  $m_0^U$ , que no es necesariamente la misma desde la cual se recibió la señal en el DL,  $m_0^D$ . Esa SINR se puede escribir como [13], [12], [7], [21]:

$$SINR^U = \frac{P_0^{tx} G_0^{m_0^U} H_{0,m_0^U}^U}{N_0 + \sum_{z \in U} P_z^{tx} G_z^{m_0^U} H_{z,m_0^U}^U} \quad (\text{A.4.3})$$

con  $P_z^{tx}$  y  $P_0^{tx}$  la potencia transmitida tras el control de potencia por los usuarios  $z$  y 0, respectivamente, según la ecuación (A.3.9). Todos los desvanecimientos de los canales ( $H_{0,m_0^D}^D$ ,  $H_{0,m}^D$ ,  $H_{0,m_0^U}^U$  y  $H_{z,m_0^U}^U$ ) se suponen variables exponenciales idénticamente distribuidas.

Por su parte, la CCDF conjunta (Joint CCDF, JCCDF) para la SINR de los enlaces ascendente y descendente viene dada por:

$$F_{SINR^D, SINR^U}(x, y) = Prob[SINR^D > x, SINR^U > y]. \quad (\text{A.4.4})$$

Las CCDFs marginales para el DL y el UL, pueden obtenerse fácilmente de la JCCDF tomando  $x = 0$  e  $y = 0$ , respectivamente. De la expresión de la JCCDF, está claro que, si bien puede adivinarse que existe independencia entre ambas SINRs cuando se condiciona a las distancias existentes en la red, existe una correlación clara entre las distribuciones de las distancia. Así, esta probabilidad conjunta no puede

asumirse sin discusión como el producto de las probabilidades,  $F_{SINR^D, SINR^U}(x, y) \neq F_{SINR^D}(x)F_{SINR^U}(y)$  (como sí se encuentra en [9]). Además, el acoplamiento entre los enlaces ascendente y descendente crea una dependencia mayor no considerada en trabajos previos [26].

Llamaremos Probabilidad de Éxito en la Transmisión (Transmission Success Probability, TSP) a la probabilidad de que ambas SINR en los enlaces ascendentes/descendentes sean mayor que cierto umbral  $x$ , es decir,

$$TSP(x) = F_{SINR^D, SINR^U}(x, x) = Prob[SINR^D > x, SINR^U > x]. \quad (A.4.5)$$

### A.4.2 Carga de la celda

Cada BS dispone de ciertos recursos que son compartidos entre los usuarios asociados a ella. Denotamos como  $N^l$  el número total de usuarios que comparten los recursos de la BS en el enlace ascendente ( $l = U$ ) o el enlace descendente ( $l = D$ ) y que denominamos carga. La carga es, por supuesto, otra variable aleatoria que depende de la realización de las posiciones de las BSs y los usuarios. Se pueden encontrar en la literatura ciertos resultados teóricos o aproximaciones para la carga celular promedio bajo varios criterios de asociación [21] [10].

Utilizar la expansión de rango para las picoceldas ( $\tau > 1$ ) aumenta el porcentaje de usuarios asociados a esa capa. Esos usuarios, sin embargo, estarán más lejos del pico BS y por lo tanto tendrán SINR peor. Por supuesto, para los criterios de asociación acoplados, tanto las cargas de enlace ascendente como de enlace descendente son las mismas. Bajo criterios desacoplados, se espera que la capa de picoceldas (más abundantes) proporcione soporte a un conjunto más amplio de usuarios en el UL.

Como se ha descrito anteriormente, también hemos tenido en cuenta los límites debidos a la señalización. Hemos considerado un número máximo de usuarios  $N_{max}$  que pueden comunicarse simultáneamente a/desde una BS. Si el número de usuarios

asociados a una BS específica es mayor que este límite, el grupo de usuarios activos se selecciona aleatoriamente dentro de ese grupo. Los usuarios no seleccionados (si los hay) se consideran inactivos y no se les asigna recursos. Para densidades de usuario bajas, también sería posible que una determinada BS tenga carga cero.

### A.4.3 Eficiencia espectral simétrica

La eficiencia espectral se define como la tasa de información que puede ser transmitida a través de un ancho de banda dado en un sistema de comunicación. Es una tasa neta de bits de un canal de comunicación, limitado superiormente por el conocido límite de Shannon para la eficiencia espectral:

$$\eta_s^l = \log_2(1 + SINR^l). \quad (\text{A.4.6})$$

donde  $l$  es el enlace analizado. La CCDF conjunta para la eficiencia espectral viene dada por:

$$F_{\eta_s^D, \eta_s^U}(x, y) = \text{Prob} [\eta_s^D > x, \eta_s^U > y] \quad (\text{A.4.7})$$

Las CCDF marginales para la eficiencia espectral UL y DL se pueden obtener a partir de ella. Para servicios simétricos, tanto el enlace ascendente como el descendente deben ser capaces de llevar suficiente información. Se considera entonces la variable aleatoria eficiencia espectral simétrica (Symmetric Spectral Efficiency)  $\eta^{sym}$  cuya CCDF viene dada por:

$$F_{\eta^{sym}}(x) = \text{Prob} [\eta^{sym} > x] = \text{Prob} [\eta^{DL} > x, \eta^{UL} > x] \quad (\text{A.4.8})$$

Los sistemas reales como LTE-A no son capaces de alcanzar la eficiencia espectral de Shannon, sino que se emplea en su lugar modulación y codificación adaptativas (Adaptive Modulation And Coding, AMC). En ese caso, el sistema evita superar una determinada tasa de error de bloque de destino (Block Error Rate, BLER), por ejemplo de 10%, utilizando esquemas más robustos cuando el canal empeora

mientras se obtiene un mejor rendimiento aumentando el número de bits por símbolo del esquema a medida que el canal mejora. Aunque el rendimiento cualitativo considerando el límite de Shannon y AMC es similar [32], AMC limita la máxima eficiencia espectral (por ejemplo, a 256QAM) y, por tanto, la tasa binaria alcanzable. Además, con cierta probabilidad los usuarios se mantienen en interrupción (sin transmisión) para AMC. Por lo tanto, bajo AMC, sólo ciertos valores discretos de eficiencia espectral (inferior a los límites de Shannon) son capaces de alcanzar.

Para implementar AMC, el rango de SINR se divide en  $L$  regiones de desvanecimiento  $\mathfrak{R}_i = \{\Psi_{i-1}, \Psi_i\}$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, L-1$  with  $\Psi_{-1} = 0$  and  $\Psi_{L-1} = \infty$ . Dentro de la región de desvanecimiento  $\mathfrak{R}_i$ , se emplea un esquema de modulación con  $M_i$  bits por símbolo. Por debajo de  $\Psi_0$  no se emite ninguna transmisión y se dice que el UE está en interrupción. Por encima de  $\Psi_{L-2}$ , ningún incremento en SINR es capaz de mejorar la eficiencia espectral. El conjunto de umbrales de conmutación entre las constelaciones debe diseñarse para cumplir con ciertas limitaciones y optimizar los indicadores clave de rendimiento en el sistema [32]. Se ha considerado a lo largo de este trabajo una tasa máxima de error de bloque (BLER) que se mantendrá para todos los estados del canal.

La eficiencia espectral de AMC se puede escribir como una función del SINR como:

$$\eta_{AMC}^l = \log_2(M_i), SINR^l \in [\Psi_{i-1}, \Psi_i]. \quad (A.4.9)$$

Se puede escribir una expresión equivalente a la ecuación (A.4.7) para la eficiencia espectral conjunta con AMC.

#### A.4.4 Tasa binaria

Para el conjunto activo de usuarios asociados a una BS específica, en esta tesis se considera que el ancho de banda se comparte por igual entre ellos (como ocurre con los mecanismos de planificación tipo proporcionales o los de reparto por turnos) y



se asume que el ancho de banda es infinitamente divisible. Además, se supone que todas las colas para la transmisión de enlace descendente y de enlace ascendente están saturadas, es decir, cada BS y UE siempre tiene datos para transmitir. La tasa para el usuario típico puede escribirse entonces como:

$$R^l = \frac{W}{N^l} \eta^l, \quad (\text{A.4.10})$$

done  $\eta^l$  viene dada por la ecuación A.4.6 o A.4.9,  $W$  es el ancho de banda (considerado simétrico) and  $N^l$  es la carga de la celda para el enlace ascendente ( $l = U$ ) o descendente ( $l = D$ ).

La CCDF conjunta para la tasa binaria es:

$$F_{R^D, R^U}(x, y) = \text{Prob} [R^D > x, R^U > y]. \quad (\text{A.4.11})$$

Para servicios simétricos, ambos enlaces deben ser capaces de llevar suficiente información. Definimos la tasa binaria simétrica (Symmetric Rate)  $R^{sym}$  como aquella cuya CCDF viene dada por:

$$F_{R^{sym}}(x) = \text{Prob} [R^{sym} > x] = \text{Prob} [R^D > x, R^U > x], \quad (\text{A.4.12})$$

### A.4.5 Eficiencia energética

La eficiencia energética de un enlace se define como el cociente entre la velocidad de transmisión obtenida y el consumo de potencia, con unidades de bits/Joule [34]. Representa cuánta energía es necesaria para transmitir un bit de información:

$$EE^l = \frac{R^l}{P_0^l} \quad (\text{A.4.13})$$

Donde  $P_0^U = P_0^{tx}$  denota la potencia transmitida por el usuario 0 en el UL para obtener la velocidad  $R_l$ . En cuanto a la potencia que necesita la BS a la que está asociado el usuario,  $P_0^D$ , se puede escribir como la suma de la potencia de transmisión, es decir,  $P_1$  o  $P_2$  dependiendo de la capa, más un cierto gasto de energía en reposo,  $P_M$  y  $P_P$ , para las macro o las pico celdas, respectivamente.

### A.4.6 Justicia

Con el fin de evaluar la equidad del sistema, se ha evaluado en este trabajo el índice de Jain. Se trata de un estimador del índice de dispersión capaz de calificar la equidad de un conjunto de valores sin ser indebidamente sensible a los valores atípicos. Este índice (Jain's Fairness Index, JFI) se calcula como:

$$\mathcal{J}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2}, \quad (\text{A.4.14})$$

Hay  $n$  usuarios y  $x_i$  es la velocidad binaria para el usuario  $i$  –ésimo. El resultado va desde  $\frac{1}{n}$  (caso peor) hasta 1 (mejor equidad), y es máximo cuando todos los usuarios reciben la misma tasa. Además, es  $\frac{k}{n}$  cuando  $k$  usuarios comparten los recursos de forma equitativa, y los otros  $n - k$  usuarios de reciben asignación cero (es decir, están inactivos o en interrupción).

## A.5 Resultados numéricos

En este capítulo, se analizan varias métricas de red de redes celulares heterogéneas, que indican el rendimiento del sistema. También se discute el impacto de varios parámetros del sistema en estos indicadores de desempeño bajo diversos criterios de acoplamiento y asociación a través de las simulaciones. Excepto que se explice, los parametros de simulaciones se resumen en la Tabla A.2.

### A.5.1 Distribución de los principales indicadores para los parámetros por defecto

#### Cobertura

Se ha evaluado la probabilidad de cobertura conjunta dada por la ecuación (A.4.5) junto con las probabilidades marginales de cobertura de los enlaces ascendente y

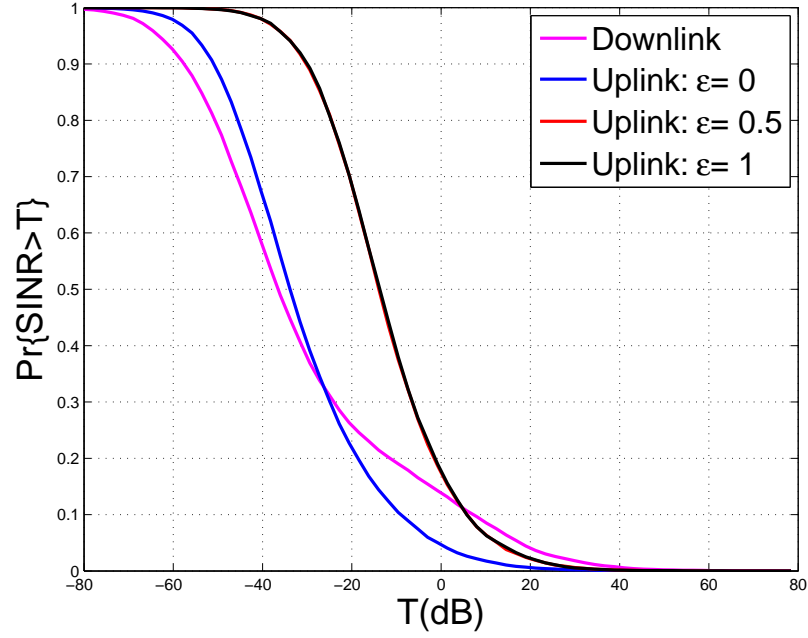


Figure A.4: CCDF para la SINR de los enlaces ascendente y descendente para el criterio C1.

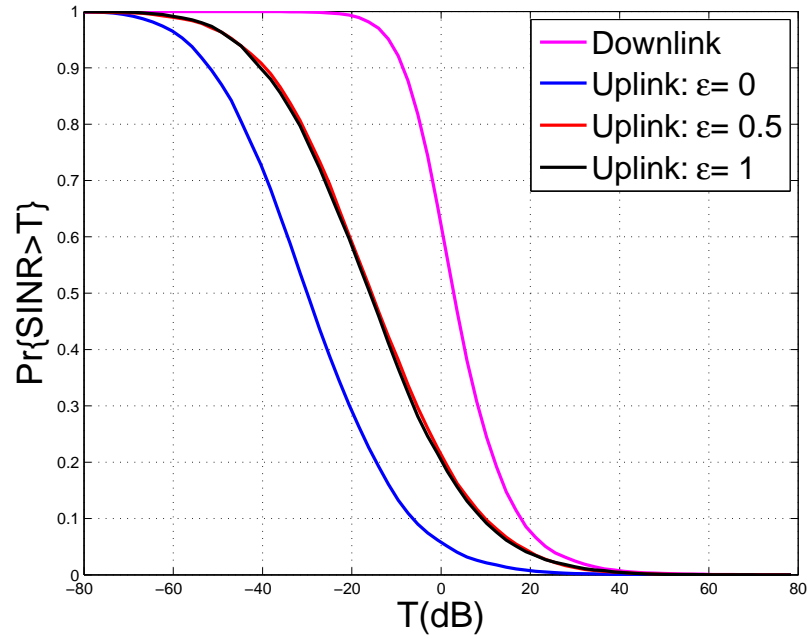


Figure A.5: CCDF para la SINR de los enlaces ascendente y descendente para el criterio C2.

## A.5. RESULTADOS NUMÉRICOS

Table A.2: Parámetros del sistema, notación y valores de simulación por defecto.

Parámetro (Número de capa: $k = 1$ macro, $k = 2$ pico)	Notación	Valor por defecto
Factor de densidad del usuario	$\gamma = \lambda_u / \lambda_{BS}$	10
Proporción de densidades de BS de pico y macrocelda	$\beta = \lambda_2 / \lambda_1$	4
Sesgo de expansión del rango de celda	$\tau_1 = 1, \tau_2 = \tau$	0 dB
Número máximo de usuarios activos por BS	$N_{max}$	60
Potencia de transmisión en UL en bucle abierto	$P_u$	0 dBm
Índice de control de potencia fraccional	$\epsilon$	0
Potencia de transmisión en DL	$\{P_1, P_2\}$	$\{46, 24\}$ dBm
Ganancia de la antena BS	$\{G_1, G_2\}$	$\{15, 2\}$ dB
Ganancia de la antena del usuario	$G_u$	0 dB
Máxima potencia de transmisión UL	$P_{max}$	23 dBm
Pendientes de las pérdidas del camino	$\{K_1, K_2\}$	$\{128.1, 140.7\}$ (dB)
Exponentes de las pérdidas del camino	$\alpha_1, \alpha_2$	$\{3.76, 3.67\}$
Promedio de sombra	$\sigma_1, \sigma_2$	$\{10, 6\}$ (dB)
Densidad espectral de potencia de ruido	$N_0$	-174 dBm/Hz
Ancho de banda UL/DL	$W^U, W^D$	10 MHz

descendente para el conjunto de parámetros dado en la Tabla A.2. Los resultados para los criterios C1, C2 y C2 se muestran en Fig. A.4, Fig. A.5, y Fig. A.6. Se han obtenido resultados de enlace ascendente sin control de potencia fraccional  $\epsilon = 0$ , así como utilizando control de potencia fraccional con índice  $\epsilon = 0,5$  y control de potencia total ( $\epsilon = 1$ ).

Bajo el criterio de asociación a la BS más cercana (C1), la mayoría de los usuarios están acampados en BSs de picocelda e debido a su mayor densidad ( $\beta = 4$ ). En el enlace descendente, como las picoceldas transmiten con poca potencia y son muy interferidas por las macroceldas, en la mayoría de los casos la SINR es menor que la del enlace ascendente, sobre todo para valores altos de  $\epsilon$ . Sin embargo, para valores mayores de  $T$  ( $-20dB$ ), los usuarios (de interior de celda habitualmente)

Table A.3: Indicadores clave de rendimiento del sistema.

Indicador de rendimiento	Notación	Medición por defecto
Probabilidad de cobertura	$P_c^U, P_c^D$	Porcentaje
Usuarios activos asociados a cada capa	$A_k^U, A_k^D$	Porcentaje promedio
Carga de las celdas (para BSs no vacías)	$N^U, N^D$	Promedio
Usuarios inactivos por capa	$In^M, In^P$	Percentage
Usuarios en interrupción	$Out^U, Out^D$	Percentage
Eficiencia espectral para límite de Shannon	$\eta_s^U, \eta_s^D$	Promedio
Eficiencia espectral para AMC	$\eta_{AMC}^U, \eta_{AMC}^D$	Promedio
Tasa binaria para límite de Shannon	$R_s^U, R_s^D$	Promedio, índice de Jain
Tasa binaria para AMC	$R_{AMC}^U, R_{AMC}^D$	Promedio, índice de Jain
Eficiencia energética para usuarios activos	$EE^U, EE^D$	Average

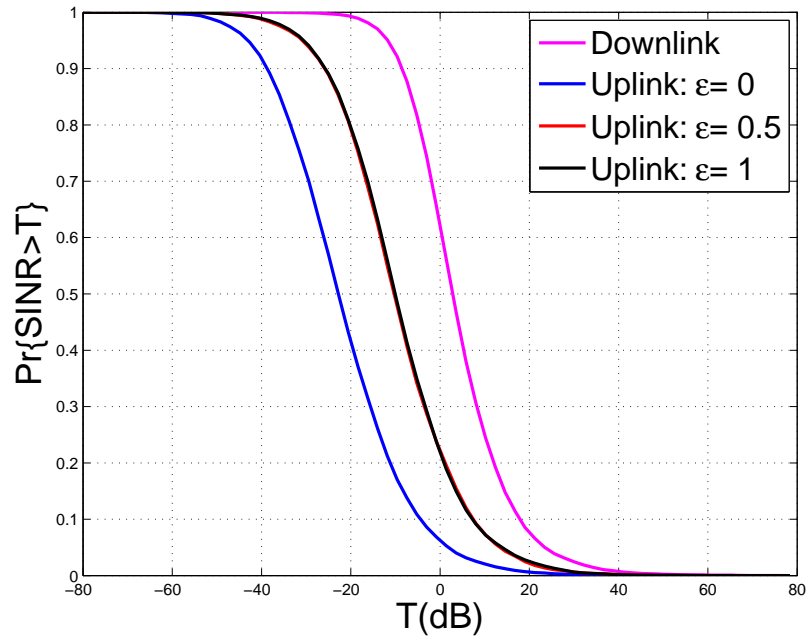


Figure A.6: CCDF para la SINR de los enlaces ascendente y descendente para el criterio C3.

mejoran su potencia de señal en el DL, lo que mejora su cobertura (parte derecha de la Fig. A.4). Como consecuencia, existe una amplia disparidad de cobertura entre el enlace ascendente y el enlace descendente que tiene consecuencias sobre el diseño de los HCN y obliga a los investigadores a averiguar el valor óptimo para la transmisión simétrica bajo diferentes parámetros del sistema y criterios de asociación.

Respecto al criterio C2, los usuarios se asocian principalmente a las macro BS debido a su mayor potencia de transmisión, también impulsada por la diferencia en las ganancias de antena de las macro y pico celdas. Como es de esperar, la probabilidad de cobertura de enlace descendente ( $P_c^D$ ) es mejor que la cobertura de enlace ascendente ( $P_c^U$ ) como se muestra en la Fig. A.5. En el criterio C3, los usuarios se asocian de acuerdo con la potencia media recibida máxima en el DL y las pérdidas de camino mínima en el UL. Asimismo, en el criterio C2, la mayoría de los usuarios en los criterios C3 también están acampados en BS macro. En DL, UEs están conectados a macro BSs por la misma razón de mayor potencia de BS macro como en C2, pero en UL están vinculados a macro BSs por la razón diferente. La razón que obliga a la mayoría de los usuarios a asociarse con BS macro en lugar de pico BSs en UL se encuentra en la diferencia de pendientes para las pérdidas del camino ( $K_1$  &  $K_2$  como se muestra en la Tabla A.2) por las alturas de las antenas de los dos tipos de BSs. Es por eso que la mayoría de los usuarios esperan una pérdida mínima de camino de BSs macro en lugar de BSs pico. Inevitablemente  $P_c^D$  es mejor que  $P_c^U$  en C3 por la misma razón que se discutió bajo el criterio C2 que se muestra en la Fig. A.6.

Además, cabe señalar que mediante la utilización de control de potencia fraccional en la red celular heterogénea de enlace ascendente, la probabilidad de cobertura ha mejorado en todos los criterios con el aumento de  $\epsilon$ . La razón es que los usuarios transmiten con más potencia aumentando  $\epsilon$  lo que, en última instancia, mejora la potencia deseada.

La probabilidad de éxito de transmisión (TSP) como la probabilidad de que la

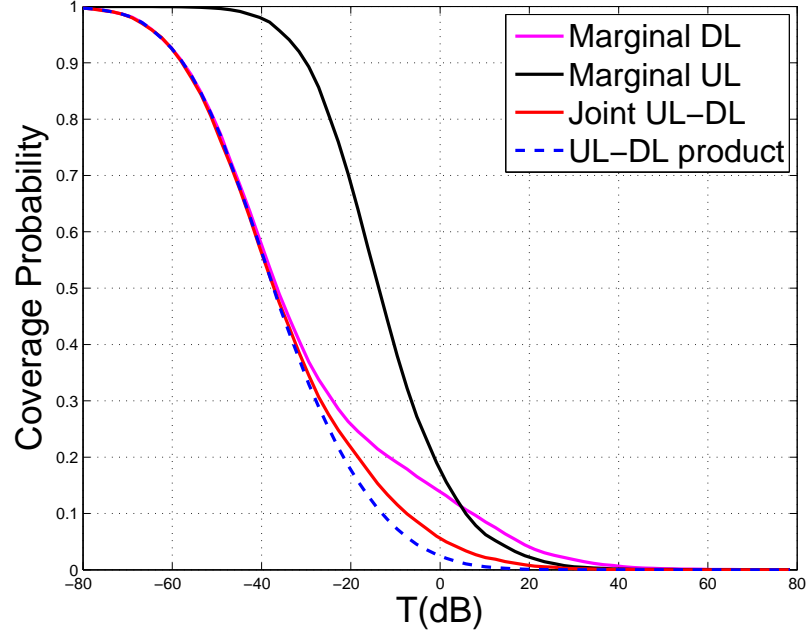


Figure A.7: Probabilidades de cobertura conjuntas y marginales para los enlaces ascendentes y descendentes para el criterio C1 y  $\epsilon = 1$ . Se muestra también el producto de ambas marginales.

SINR de los enlaces ascendente y descendente sea mayor que el cierto umbral  $x$  descrito en la ecuación A.4.5 se muestra en Fig. A.7, Fig. A.8 y Fig. A.9 para los casos C1, C2 y C3 respectivamente. Como ambas SINR deben ser mayores que  $x$ , la TSP es siempre menor que ambas probabilidades marginales. La suposición de independencia entre las SINRs marginales también se explora en esas figuras. TSP se compara con el producto de las probabilidades marginales de enlace ascendente y descendente. Si ambos SINRs fueran independientes, ambos resultados deberían encajar. Sin embargo, es evidente que la TSP no es simplemente igual al producto de las probabilidades marginales de enlace ascendente y descendente. La dependencia es más fuerte bajo el criterio de asociación de BS más cercanos (C1) comparado con el de la potencia media recibida (C2) y el caso C3 como se muestra en la Fig. A.10.

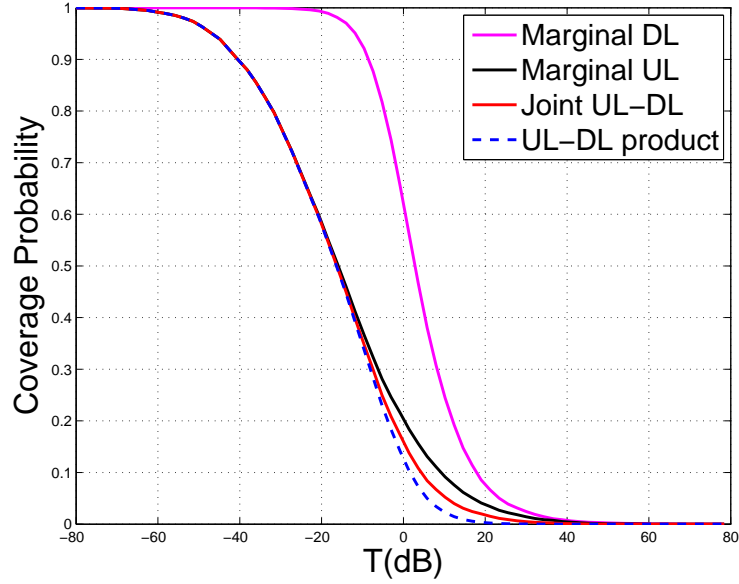


Figure A.8: Probabilidades de cobertura conjuntas y marginales para los enlaces ascendentes y descendentes para el criterio C2 y  $\epsilon = 1$ . Se muestra también el producto de ambas marginales.

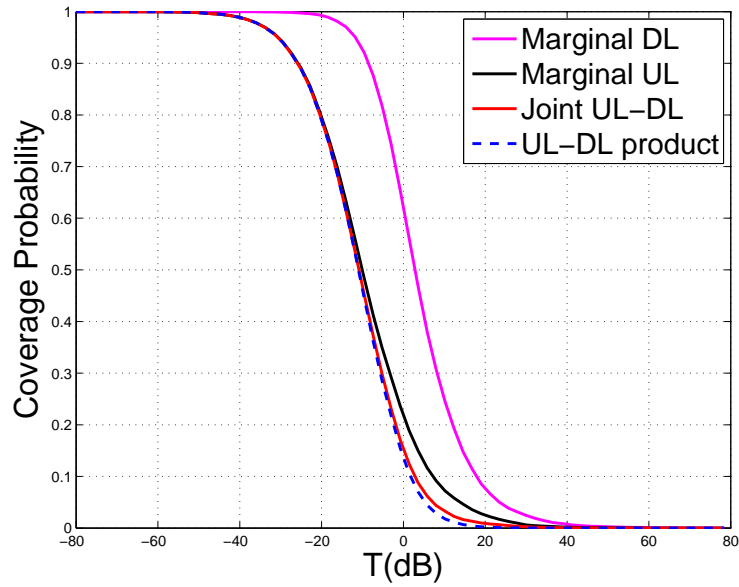


Figure A.9: Probabilidades de cobertura conjuntas y marginales para los enlaces ascendentes y descendentes para el criterio C3 y  $\epsilon = 1$ . Se muestra también el producto de ambas marginales.



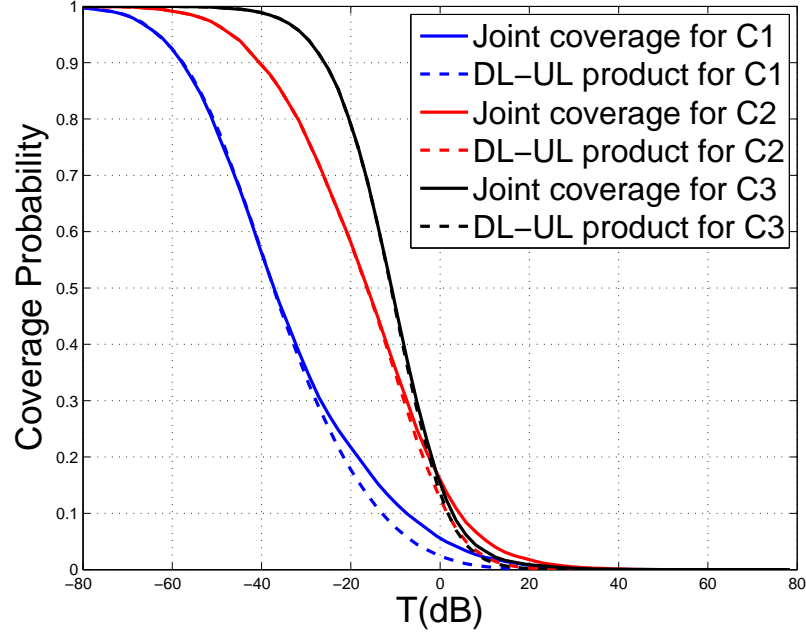


Figure A.10: Probabilidad de cobertura conjuntas comparada con la probabilidad evaluada asumiendo que son independientes.

### Eficiencia espectral

El conjunto de umbrales entre esquemas de modulación considerados en este trabajo, que se muestra en la tabla A.4, fue diseñado con la ayuda de un simulador de enlace LTE disponible en [29]. La Fig. A.11 muestra los valores de la eficiencia espectral para el mayorante de Shannon y con los umbrales de dicha tabla obtenidos del simulador LTE. Los umbrales se han obtenido como aquellos que maximizan la eficiencia espectral mientras que la tasa de error de bloque (Block Error Rate, BLER) instantánea no se eleva por encima del 10%. Se han asumido ideales la estimación del canal y la realimentación del estado del canal. Para los valores de SNR por debajo del umbral mínimo (es decir, en condiciones de canal muy pobre), hay un estado de interrupción en el que no hay transmisión de datos.

Como era previsible, se observa claramente de la comparación de las probabilidades marginales de la eficiencia espectral en el enlace descendente mostradas

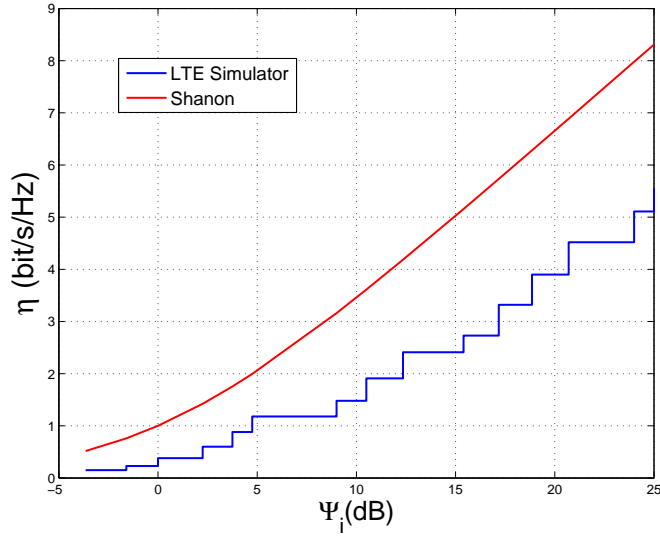


Figure A.11: Eficiencia espectral para el límite de Shannon y con los umbrales obtenidos del simulador LTE para modulación y codificación adaptativa en función de la SINR.

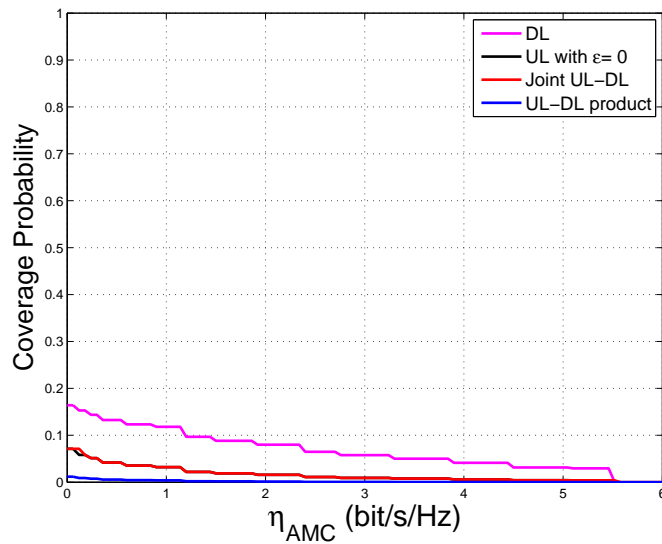


Figure A.12: CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C1,  $\epsilon = 0$ .

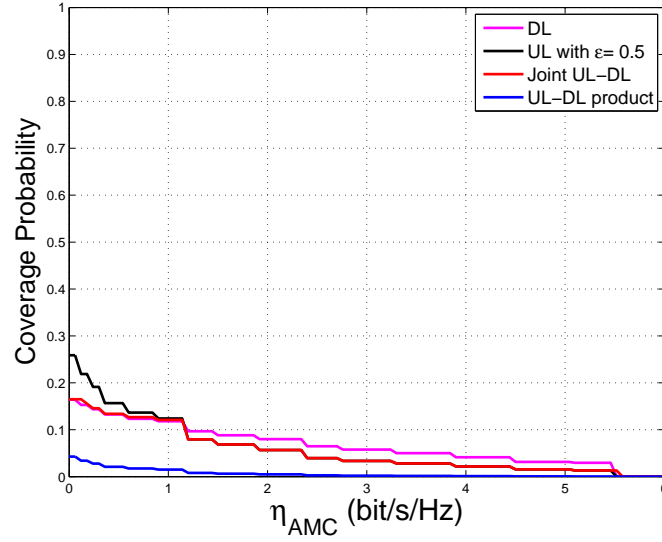


Figure A.13: CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C1,  $\epsilon = 0.5$ .

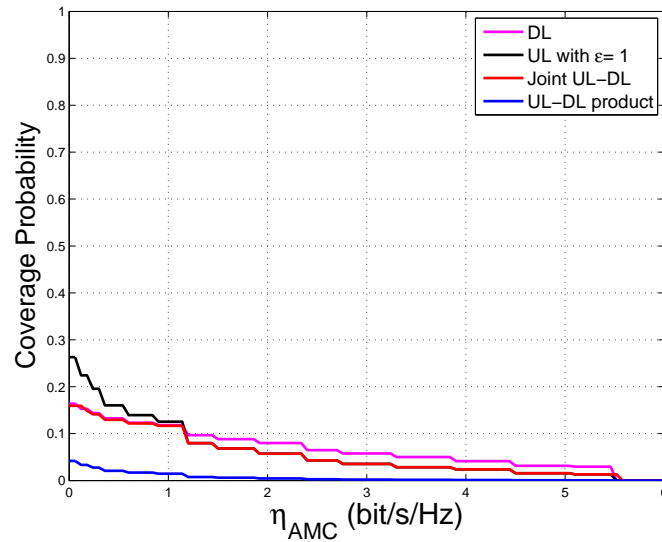


Figure A.14: CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C1,  $\epsilon = 1$ .

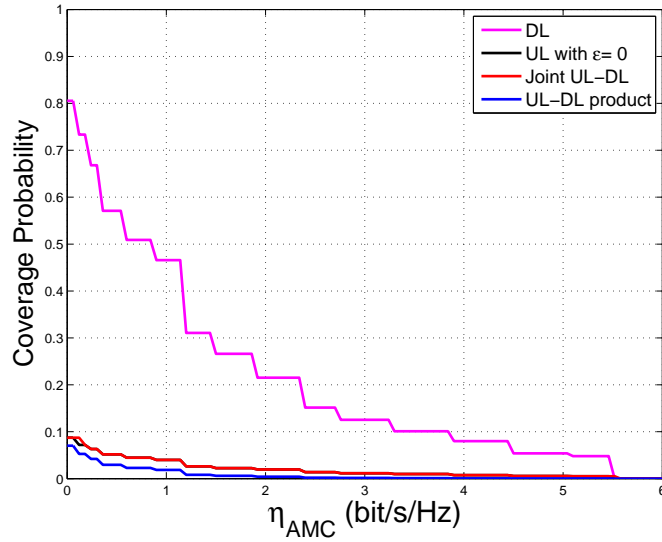


Figure A.15: CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C2,  $\epsilon = 0$ .

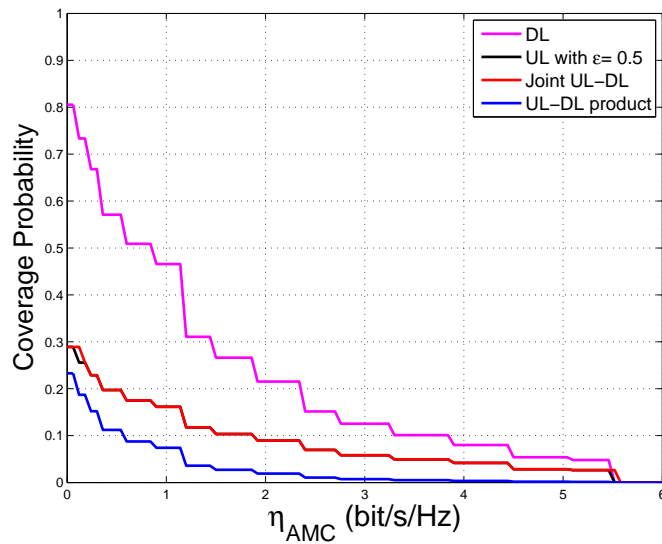


Figure A.16: CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C2,  $\epsilon = 0.5$ .

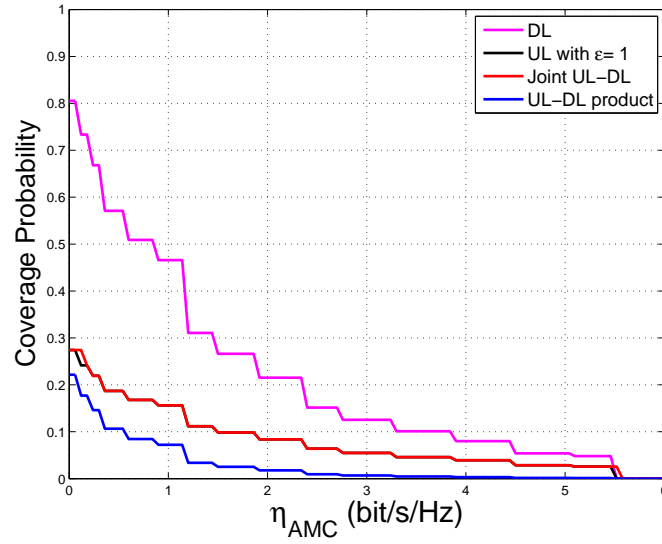


Figure A.17: CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C2,  $\epsilon = 1$ .

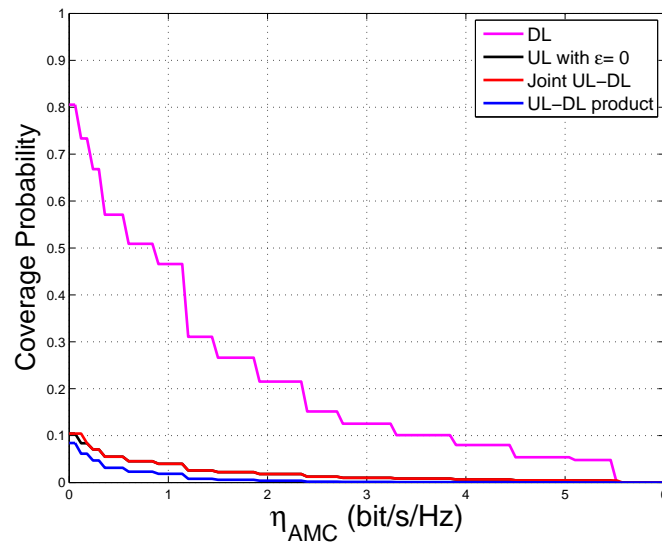


Figure A.18: CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C3,  $\epsilon = 0$ .

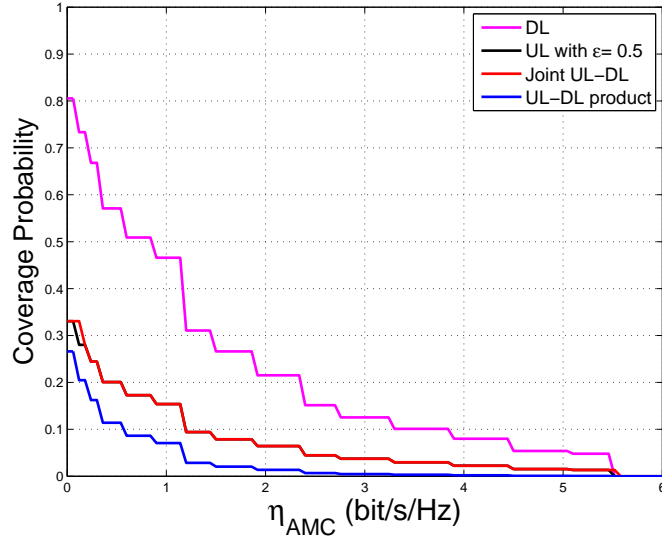


Figure A.19: CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C3,  $\epsilon = 0.5$ .

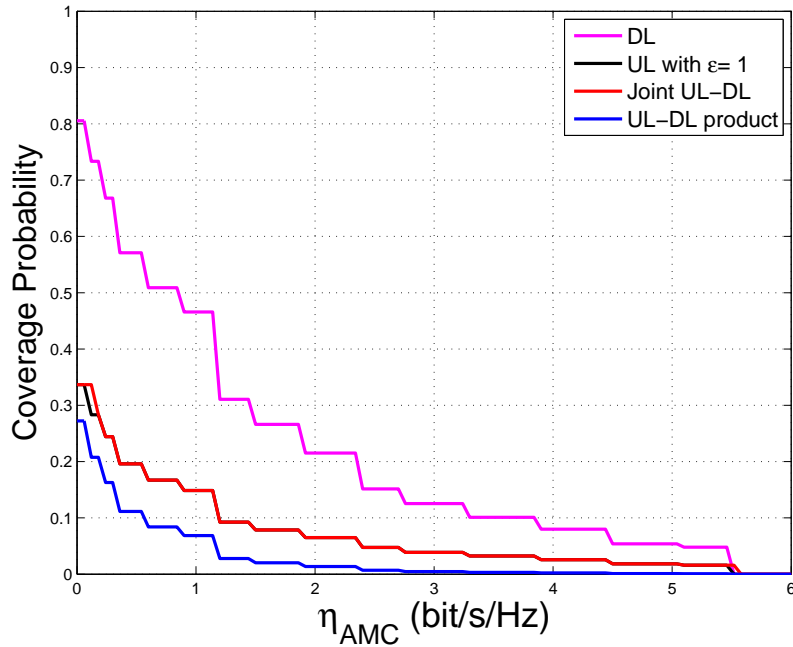


Figure A.20: CCDF de la eficiencia espectral conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C3,  $\epsilon = 1$ .

Table A.4: Umbrales de conmutación entre esquemas de modulación y codificación obtenidos del simulador LTE.

$\Psi_i(dB)$	-3.7 , -1.6 , 0.0 , 2.3 , 3.8 , 4.8 , 9.0 , 10.5 , 12.4 , 15.4 , 17.2 , 18.9 , 20.7 , 24
$\log_2(M_i)$	0.2 , 0.2 , 0.4 , 0.6 , 1.2 , 1.5 , 1.9 , 2.4 , 2.7 , 3.3 , 3.9 , 4.5 , 5.1 , 5.6

en las figuras numeradas desde Fig. A.12 hasta Fig. A.20 que la probabilidad de cobertura bajo el criterio de máxima potencia media es mejor que cuando la asociación se hace a la BS más cercana. Ambos enlaces, ascendente y descendentes, emplean diferente potencia para la transmisión, por lo que ambas probabilidades de cobertura son diferentes.

A partir de la comparación de las probabilidades marginales de rendimiento espectral de enlace descendente para los criterios C1, C2 y C3, como se muestra en las figuras desde Fig. A.12 a Fig. A.20, la probabilidad de cobertura de enlace descendente bajo los criterios de asociación de C2 es mucho mejor que la de C1. Como el enlace ascendente y descendente tienen diferente potencia de transmisión, por lo que la probabilidad de cobertura para el enlace ascendente y descendente es diferente.

Fijándonos específicamente en las figuras relativas al criterio C1 Fig. A.12, Fig. A.13 and Fig. A.14, se observa que para la asociación a la BS más cercana el enlace ascendente tiene mejor cobertura que el enlace descendente, lo que fuerza a la cobertura conjunta de ambos enlaces a bajar. A medida que aumentamos el índice del control de potencia fraccional  $\epsilon$  de 0 (sin control de potencia) a 1 (control de potencia total), la cobertura del enlace ascendente va disminuyendo debido a la creciente potencia de interferencia ya que no se ha puesto límite a la potencia transmitida por el usuario. Es decir, para una transmisión simétrica, usar control de potencia mejora el rendimiento del sistema.

Los resultados cuando el usuario está asociado a la BS que se recibe con una

potencia media más alta en el DL se muestran en la Fig. A.15, la Fig. A.16 y Fig. A.17. En este caso, la cobertura de enlace descendente es mejor que la del enlace ascendente. Sin embargo, cuando el índice de control de potencia se incrementa más allá de  $\epsilon = 0$ , la eficiencia espectral de enlace ascendente aumenta. La eficiencia espectral simétrica aumenta y es mayor que la del criterio C1 debido a su mejor cobertura en el enlace descendente.

Del mismo modo, los resultados de la utilización de los criterios C3 se muestran en la Fig. A.18, Fig. A.19 y Fig. A.20. Aunque el comportamiento es similar al del criterios C2, la probabilidad de cobertura espectral conjunta es mayor que para todos los demás criterios de asociación debido a la mayor probabilidad de cobertura del enlace ascendente. También vale la pena señalar que los resultados de  $\epsilon = 0.5$  y 1 son los mismos, lo que indica que el valor de *epsilon* requerido para obtener resultados óptimos es menor de 0.5 y se encuentra en 0.2. Para este valor los usuarios alcanzan habitualmente su máxima potencia de transmisión como se discutirá en la sección A.5.2.

### Cobertura de velocidad binaria

La transformación de la variable aleatoria como se describe en las ecuaciones (A.4.6) y (A.4.9) convierte la SINR en eficiencia para el límite de Shannon y para la modulación y codificación adaptativa, respectivamente. Se muestran principalmente resultados para AMC, ya que el comportamiento de Shannon es similar, excepto por cierta mejora debida a la brecha de SNR entre ellos [32], pero AMC es más realista.

Se ha evaluado la probabilidad conjunta de cobertura de la velocidad binaria dada por la ecuación (A.4.12) junto con las probabilidades de cobertura marginales para los enlaces ascendente/descendente. Los resultados para los criterios de asociación a la BS más cercana (criterio de asociación C1), a la BS con mayor potencia promedio en DL y UL acoplado (C2), y a la BS con mayor potencia promedio en DL y pérdidas



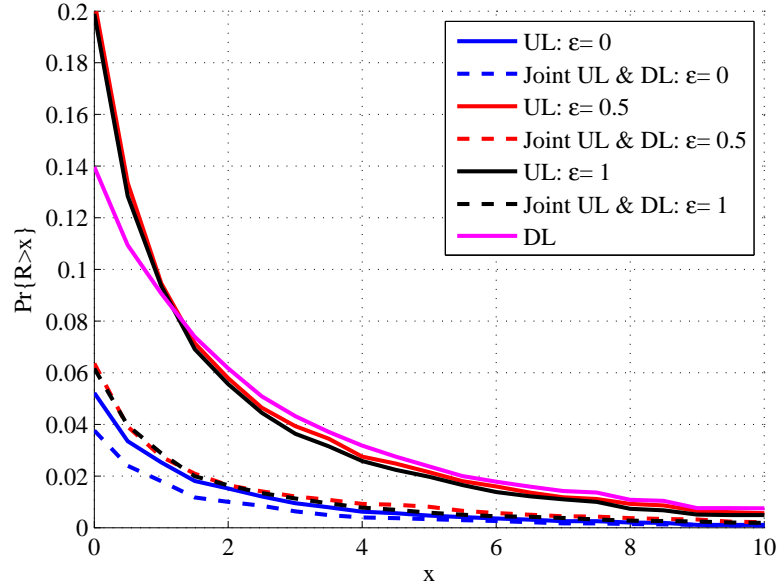


Figure A.21: CCDF de la velocidad binaria conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C1. ( $x$  in Mbps.)

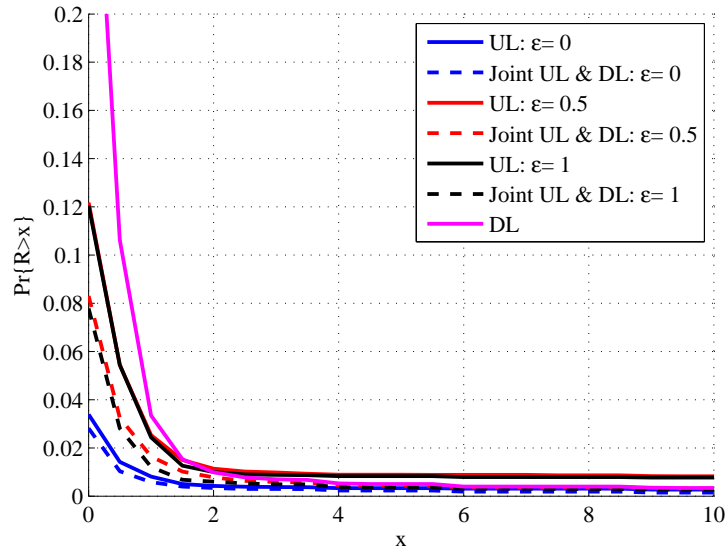


Figure A.22: CCDF de la velocidad binaria conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C2. ( $x$  in Mbps.)

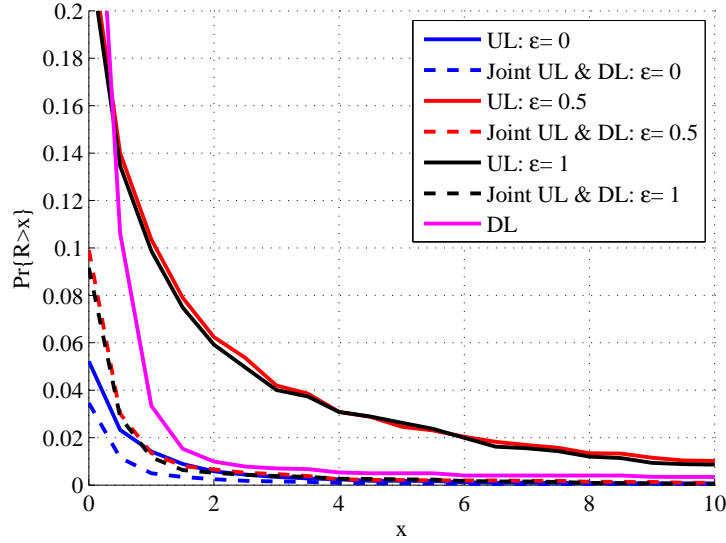


Figure A.23: CCDF de la velocidad binaria conjunta de los enlaces ascendente/descendente, marginal del enlace ascendente y marginal del enlace descendente. Criterio C3. ( $x$  in Mbps.)

del camino mínima en UL (C3) se muestran en la A.21, Fig. A.22 y Fig. A.23, respectivamente. Se han obtenido resultados para el enlace ascendente sin control de potencia fraccional  $\epsilon = 0$ , con un valor intermedio para el índice control de potencia fraccional  $\epsilon = 0,5$  y con control de potencia total ( $\epsilon = 1$ ).

Una comparación de esas tres figuras muestra que la mejor cobertura marginal para el enlace descendente es para el criterio de mejor potencia media, como se esperaba. Para el enlace ascendente, el criterio de pérdida de trayecto mínimo mejora la potencia recibida en el enlace ascendente, pero sólo ligeramente ya que los modelos de pérdidas de propagación para ambas capas de macro y pico celdas son similares.

En cuanto a la cobertura de velocidad conjunta, como ambas velocidades de UL y DL debe ser superiores al valor  $x$ , el resultado es equivalente a encontrar el mínimo de ambos. No siendo independientes [42], el resultado no puede ser expresado como el producto de ambas CCDF marginales. El comportamiento será diferente según

el criterio de asociación. Estando básicamente limitado por el UL, el criterio C2 es el peor sin control de potencia. Sin embargo, supera a la asociación con la BS más cercana si se emplea el control de potencia de enlace ascendente, incluso si no es completo (es decir,  $\epsilon \neq 1$ ). Por supuesto, dar libertad al UL para asociarse a su mejor BS, desacoplándolo del enlace descendente, mejora la cobertura conjunta (criterios de asociación C3). Sin embargo, sin control de potencia UL ( $\epsilon = 0$ ) ni expansión de rango de celda ( $\tau = 0dB$ ), el criterio más simple por distancia C1 obtiene resultados similares a los de C3 desacoplado. Sólo cuando se tienen en cuenta otros parámetros de diseño, la complejidad del desacoplamiento puede considerarse que vale la pena.

### A.5.2 Efecto en el sistema de los parámetros de diseño

Hasta este momento se han presentado la CCDF de varios indicadores para unos valores establecidos de los diversos parámetros del sistema. Sin embargo, dar una visión del comportamiento general del sistema a partir de ahí es difícil. A partir de esta sección, tratamos de desentrañar el impacto de los parámetros del sistema en el comportamiento conjunto de los enlaces descendente- ascendente y su relación con diferentes criterios de asociación. Para ello, se analizan valores promedio y también una medida de justicia, el índice de Jain.

El análisis se lleva a cabo en función de un conjunto de parámetros del sistema como son el factor de densidad del usuario  $\gamma$ , o el sesgo de expansión de rango de celda  $\tau$  que se describen en la tabla A.2. Se ha considerado aún fijos un segundo conjunto de parámetros del sistema (los que están por debajo de la línea triple en dicha tabla), como son la máxima potencia de transmisión del usuario,  $P_{max}$  o las pendientes y los exponentes de las pérdidas del camino. Las simulaciones se realizan para el rango complejo de un único parámetro mientras los demás se mantienen en sus valores por defecto, mostrados en la última columna de la tabla A.2. Los indicadores

de rendimiento clave (Key Performance Indicators, KPI) que se han obtenido de las simulaciones se presentan en la tabla A.3.

### Efecto de la densidad de usuarios y del límite de usuarios activos

El efecto de la densidad de usuarios en el rendimiento del sistema se estudia con ayuda de la figura Fig. A.24. Disminuir  $\gamma$  es equivalente a añadir más infraestructura (manteniendo la relación entre las células macro y pico). Los resultados se muestran en función de la densidad de usuarios desde  $\lambda_u = \lambda_{BS}$  (redes muy densas, en media un equipo de red por usuario en el sistema) hasta  $60\lambda_{BS}$  (redes muy cargadas).

Comenzando con la parte superior izquierda de la figura, Fig. A.24(a) evalúa el porcentaje promedio de usuarios conectados a estaciones base de macro/picocelda. La Fig. A.24(b) presenta la carga media para BSs no vacías. Fig. A.24(c) muestra el porcentaje medio de usuarios inactivos diferenciados para las BSs de macro/pico celda. El porcentaje de usuarios que se hayan en no transmisión debido a los desvanecimientos se muestra en la Fig. A.24(d). Las eficiencias espectrales  $\eta^l$  y las tasas  $R^l$  se promedian para las transmisiones marginales UL/DL en la Fig. A.24(e) y la Fig. A.24(f) respectivamente bajo una modulación y codificación adaptativa realista. El promedio y el índice de Jain para la tasa binaria de datos simétrica en ambos sentidos  $R^{sym}$  se muestran en la Fig. A.24(g) y Fig. A.24(h). Estos resultados se dan tanto para la modulación y codificación adaptativa como para el límite de Shannon. Finalmente, los resultados para la eficiencia energética para la transmisión en el DL y en UL se muestran en la Fig. A.24(i) y la Fig. A.24(j), respectivamente.

Centrándose en el criterio de asociación a la celda más cercana (denominado como C1 en la tabla A.1), el 80% de usuarios están asociados a BSs de picoceldas y el 20% de ellos a BS de macrocelda, consistentemente con el bien conocido resultado de asociación para regiones de Voronoi aplicado a los valores por defecto. Sin embargo, a medida que crece la densidad del usuario, ciertas BS pueden superar el número

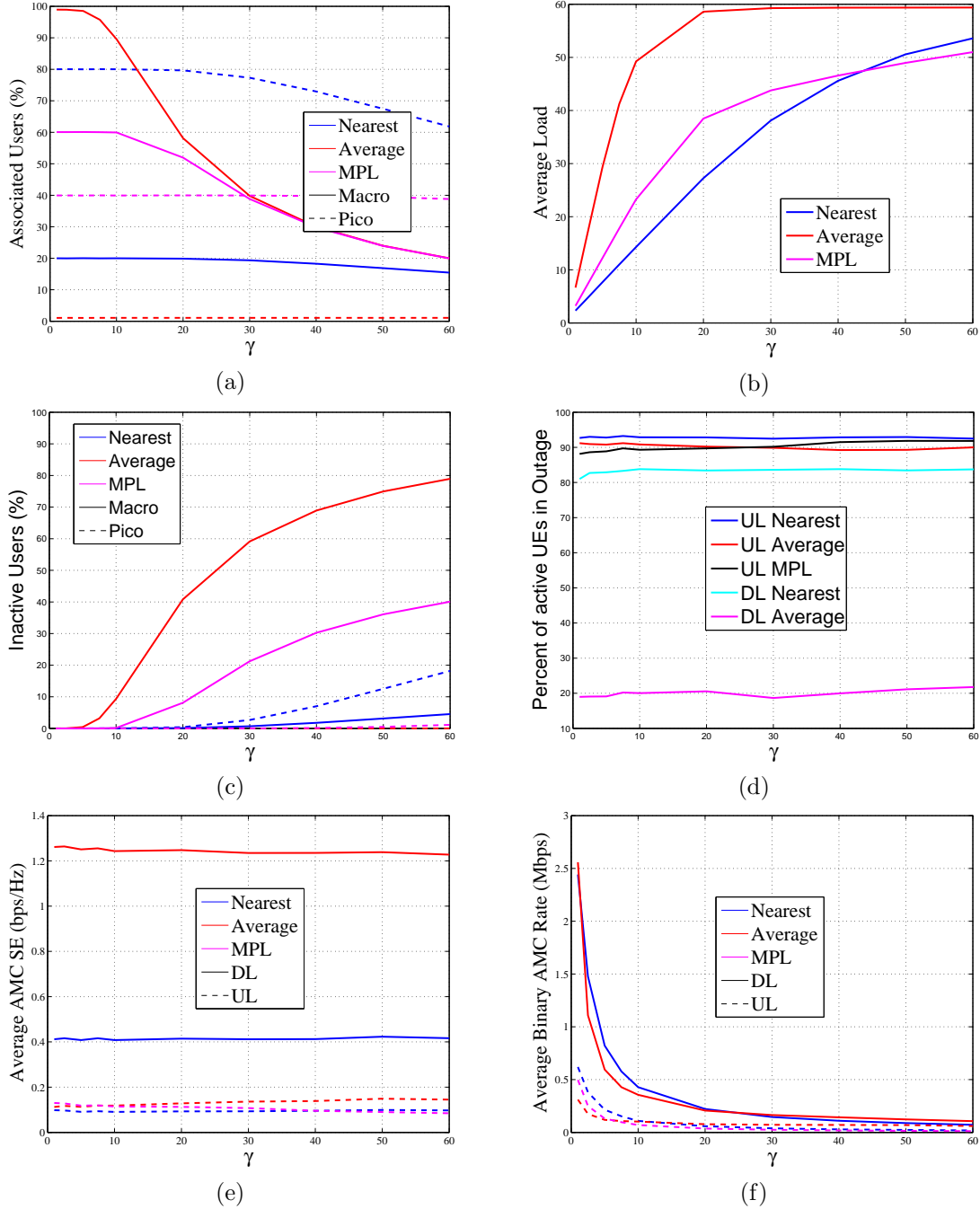


Figure A.24: Rendimiento del sistema en función de la relación de densidad de usuario  $\gamma = \lambda_u / \lambda_{BS}$ . a) Porcentaje medio de usuarios conectados a las estaciones base. b) Carga media para las BS no vacías. c) Porcentaje medio de usuarios inactivos. d) Porcentaje medio de usuarios en interrupción. e) Eficiencia espectral promedio para AMC; f) Tasa binaria promedio para AMC.

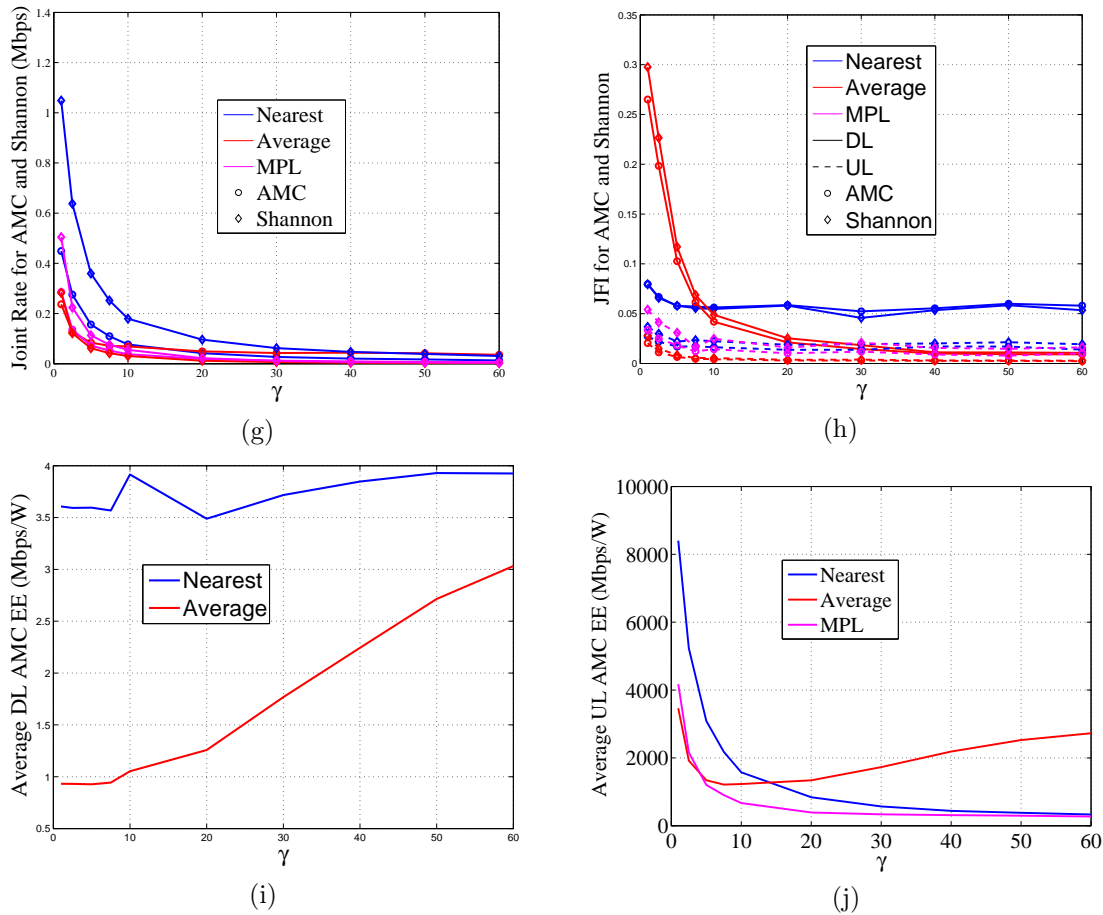


Figure A.24: Rendimiento del sistema en función de la relación de densidad de usuario  $\gamma = \lambda_u / \lambda_{BS}$ . g) Tasa conjunta promedio para AMC y para el límite de Shannon. h) Índice de Jain para la tasa binaria para AMC y para el límite de Shannon. i) Eficiencia energética media en el DL para usuarios activos. j) Eficiencia energética media en el UL para usuarios activos.

máximo de usuarios que pueden estar activos simultáneamente en una celda,  $N_{max} = 60$ . Primero las BS de picocelda y más tarde las BSs de macrocelda comienzan a saturarse y ciertos usuarios se vuelven inactivos.  $\lambda_u = 60\lambda_{BS}$  alrededor del 25% de las transmisiones no se pueden llevar a cabo ya que los usuarios están inactivos, es decir, no se les puede asignar recursos. A estas alturas, la mayoría de las BS están casi llenas y la carga promedio es cercana a  $N_{max}$  tal como se presenta en la Fig. A.24(i).

Cuando los criterios de asociación se basan en la potencia recibida en DL (denominada como C2 en la tabla A.1), la mayoría de los usuarios están asociados a la macro BS debido a una mejor pérdida de trayectoria ya una mayor potencia de transmisión. Al ser su densidad más baja, en cuanto la densidad de usuarios crece, las celdas macro se llenan y algunos usuarios se vuelven inactivos. Para  $\gamma = 10$ , aproximadamente el 10% de usuarios están inactivos, es decir, no se asignan recursos. Mientras muchas estaciones base pico están vacías, la mayoría de las celdas no vacías son BS macro con cargas muy altas, como se muestra en la Fig. A.24(b). Esto puede aliviarse mediante la expansión de rango, como se discutirá más adelante en la sección A.5.2.

La eficiencia espectral no está muy influenciada por la densidad de usuarios ni en DL ni en UL en la medida en que haya al menos un usuario asociado a cada BS. Aunque la eficiencia espectral del enlace descendente es máxima para el criterio de asociación por potencia media como muestra el menor porcentaje de usuarios en interrupción en Fig. A.24(d), la tasa binaria en el DL no es necesariamente más alta que la del criterio a la BS más cercana. La razón es que muchos usuarios de macro están inactivos y, por lo tanto, se les asigna tasa binaria nula. Además, más usuarios activos comparten los recursos de la macro BS, haciendo inútil la mejora en la eficiencia espectral. Como consecuencia, el tratamiento del usuario se vuelve más injusto (el índice de Jain es menor) a medida que crece la densidad del usuario (véase Fig. A.24(h)). El índice de Jain para AMC es muy similar al de Shannon.

La eficiencia energética (Energy Efficiency, EE) de los usuarios activos en el DL y en el UL se muestra en la Fig. A.24(i) y en la Fig. A.24(j), respectivamente. La eficiencia energética para el criterio a la BS más cercana es mejor que para el criterio a la BS con mayor potencia promedio, ya que un número elevado de usuarios se asocian con las picoceldas, que transmiten con menor potencia. En el UL, la EE va disminuyendo rápidamente para todos los criterios de asociación a medida que  $\gamma$  aumenta. El criterio por potencia media tiene inicialmente la EE más baja de todos los otros criterios de asociación debido a la alta velocidad de datos que permite pero va disminuyendo hasta alcanzar un nivel de saturación para aproximadamente  $\gamma = 15$ . Finalmente, la eficiencia energética para el criterio por potencia media aumenta después de  $\gamma = 15$  debido a la existencia de muchos usuarios inactivos en las macroceldas.

En cuanto al UL, el desacoplamiento permite que se apliquen los criterios de pérdida de trayectoria mínima (C3). Su comportamiento resulta entre el criterios de BS más cercana y de mayor potencia media. Cuando no se aplica ningún límite en el número de usuarios, alrededor del 60% están asociados a una BS de macrocelda, que tienen mejores pérdidas de trayecto. Si la densidad de usuario alcanza  $\lambda_u = 10\lambda_{BS}$ , algunos usuarios se vuelven inactivos mientras que el 40% de usuarios asociados a BSs de picocelda permanecen constantes. De forma similar al comportamiento descrito anteriormente, los criterios de MPL no son capaces de mejorar el criterio de BS más cercana excepto para redes muy densas: su eficiencia espectral es ligeramente superior, pero el aumento de carga por celda finalmente da como resultado un rendimiento similar. Al igual que en otros criterios, la tasa binaria media en el UL disminuye rápidamente con  $\gamma$  a medida que más usuarios comparten los recursos de la BS que están asociados. De hecho, para el valor por defecto  $\gamma = 10$ , no sólo el criterio C1 de BS más cercana sino también el criterio C2 es capaz de mejorar el acceso desacoplado.

Las figuras anteriores se han obtenido con un límite laxo en el número de usuarios



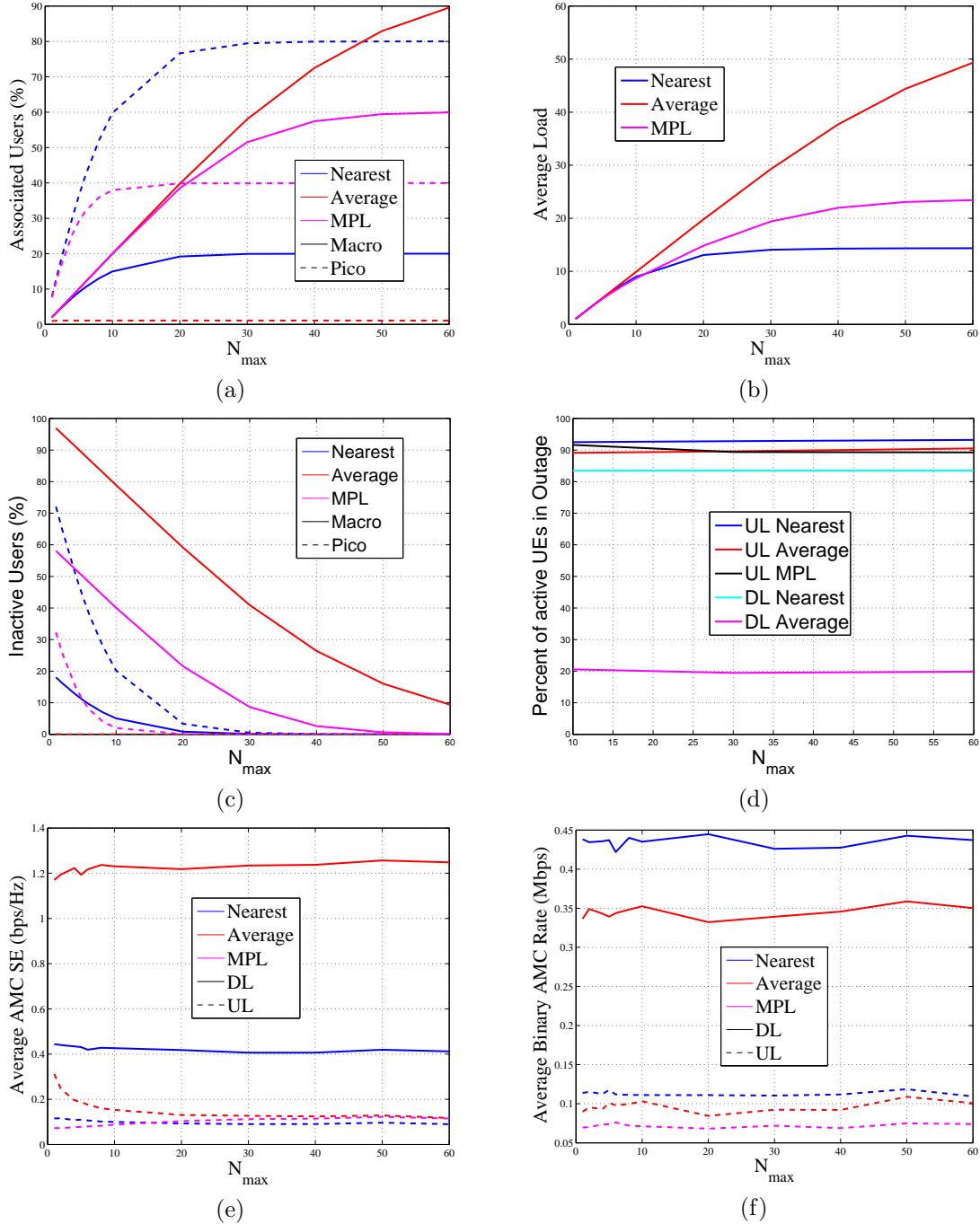


Figure A.25: Rendimiento del sistema en función del límite de usuarios  $N_{max}$ . a) Porcentaje medio de usuarios conectados a las estaciones base. b) Carga media para las BS no vacías. c) Porcentaje medio de usuarios inactivos. d) Porcentaje medio de usuarios en interrupción. e) Eficiencia espectral promedio para AMC; f) Tasa binaria promedio para AMC.

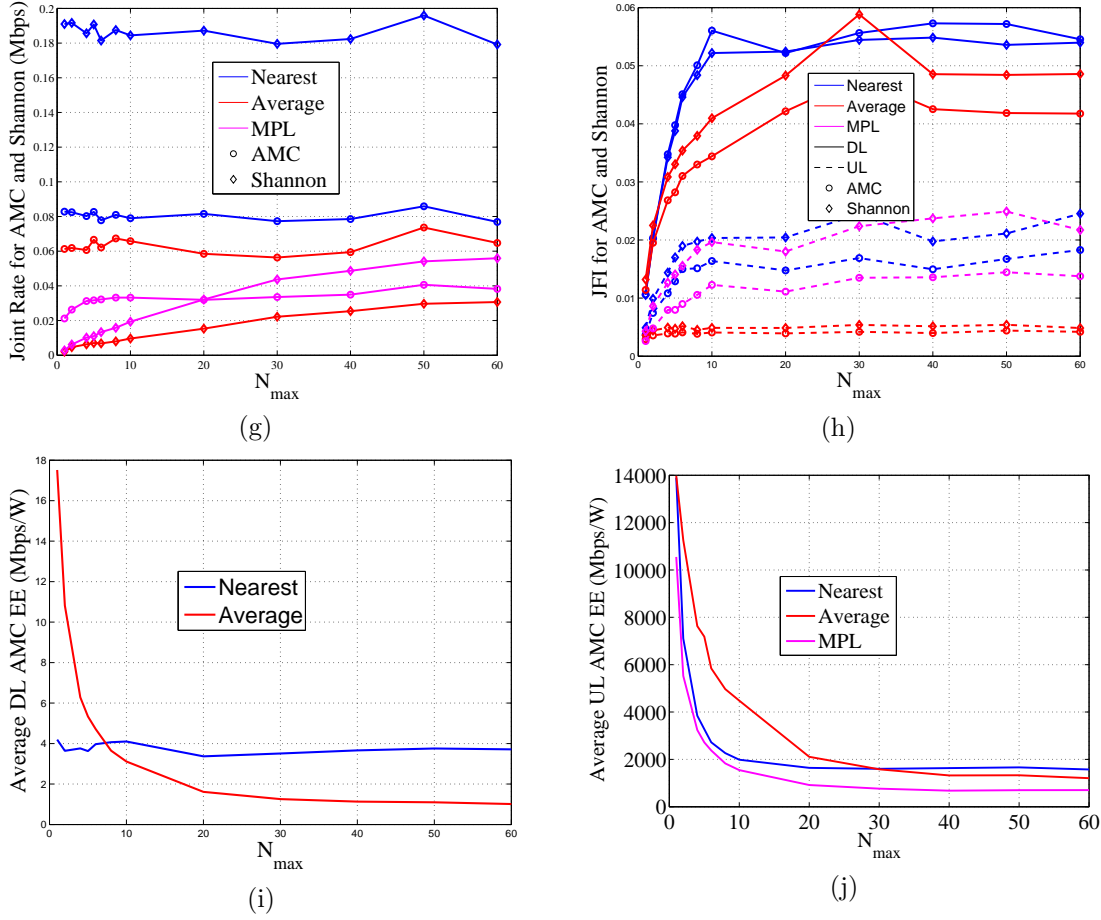


Figure A.25: Rendimiento del sistema en función del límite de usuarios  $N_{max}$ . g) Tasa conjunta promedio para AMC y para el límite de Shannon. h) Índice de Jain para la tasa binaria para AMC y para el límite de Shannon. i) Eficiencia energética media en el DL para usuarios activos para AMC. j) Eficiencia energética media en el UL para usuarios activos para AMC.

asociados a una BS,  $N_{max} = 60$ . Se analiza ahora la influencia de este parámetro. Fig. A.25 muestra resultados equivalentes a los de la Fig. A.24 pero en función del límite de usuario,  $N_{max}$ .

Cuando el límite de usuario es estricto, la mayoría de los usuarios están inactivos. El límite mínimo de señalización necesario para evitar usuarios inactivos es diferente según el criterio de asociación. Para redes con carga media como  $\gamma = 10$ , el límite de usuarios debe aumentarse hasta 30 para el criterio de BS más cercana. Para redes densas como  $\lambda_{BS} = \lambda_u$ , basta permitir que 10 – 15 usuarios estén asociados simultáneamente a cada BS para observar la relación de 80 – 20 de asociación a cada capa con el criterio de BS más cercana. El mismo valor  $N_{max} = 30$  para  $\gamma = 10$  todavía mantiene inactivos al 40% de usuarios para el criterio de BS con mejor potencia promedio como es visible en la Fig. A.25(a) y Fig. A.25(c), y la inactividad es notable aún más para un valor de  $\gamma$  superior. La razón es que para los criterios de asociación C2 (y C3 en DL) casi todos los usuarios están asociados a BSs de macrocelda y sólo un 1% de usuarios están asociados a BSs de pico celda. Nuevamente, el criterio MPL está en un lugar intermedio. Tener en cuenta el límite de usuarios por señalización al diseñar los criterios de asociación parece ser de suma importancia.

La eficiencia espectral media y la tasa binaria para AMC en función de  $N_{max}$  también se muestran en subfiguras centrales (Fig. A.25(e) y A.25(f)). La selección aleatoria de usuarios activos no modifica a los usuarios en interrupción, por lo que son constantes con  $N_{max}$ . A medida que crece el límite de usuarios, no se observa una mejora en la tasa binaria media. La razón es que, aunque más usuarios se asignan recursos a medida que  $N_{max}$  crece, la tasa binaria real que obtienen es menor, ya que tienen que compartirla con más usuarios (véase Fig. A.25(b)). La tasa media conjunta no mejora (Fig. A.25(g)) aunque el tratamiento es más justo (Fig. A.25(h)) ya que hay menos usuarios a los que no se les asigna recursos en absoluto.

Por su parte, la eficiencia energética en el enlace descendente  $EE^D$  es mejor para valores de  $N_{max}$  menores de 10 para el criterio por promedio C2, ya que más usuarios están inactivos y no emplean ninguna potencia. El resultado es mejor que para el criterio por BS más cercana cuando más usuarios activos comparten los recursos. En el enlace ascendente, la eficiencia energética decrece con  $N_{max}$  ya que más usuarios activos comparten los recursos sin que haya cambios en la potencia de uso, como sí pasa en el enlace descendente. Estos resultados se muestran en la Fig. A.25(i) y Fig. A.25(j) para DL y UL respectivamente.

### Efecto de la densidad de picoceldas y del sesgo de extensión de celda

En esta sección se estudian los efectos de la estratificación de la red. En primer lugar, se han realizado simulaciones en función de la relación de densidades pico y macro,  $\beta = \lambda_2/\lambda_1$  mientras la densidad total de BS  $\lambda_{BS}$  se mantiene en 0.24 BS/Km<sup>2</sup>.  $\beta = 1$  refleja que en promedio el número de celdas macro y pico es el mismo, mientras que  $\beta > 1$  representa el caso habitual en el cual se despliegan más picoceldas que macroceldas. El valor por defecto,  $\beta = 4$ , se utilizó en las simulaciones anteriores. La densidad del usuario se mantiene en 10 veces la densidad total de BS. Los resultados aquí presentados difieren de trabajos anteriores que obtuvieron que a medida que aumenta la densidad de BS de la capa, la carga de BS disminuye incluso en ese nivel [19]. La razón es que para nuestros resultados la densidad total de BSs se mantiene constante y sólo cambia cómo se distribuyen. Los resultados que aumentan la densidad de BS son equivalentes a los que reducen la densidad de usuario  $\gamma = \lambda_u/\lambda_{BS}$  previamente presentados.

Se puede observar fácilmente a partir de los resultados obtenidos en la Fig. A.26 que al incrementar  $\beta$ , el número de BS de pico aumenta mientras que las BS de nivel macro disminuyen en la misma cantidad. Bajo el criterio C1, ninguna BS está vacía como se muestra en la Fig. A.27. Los valores más bajos de T (dB) indican que los UE

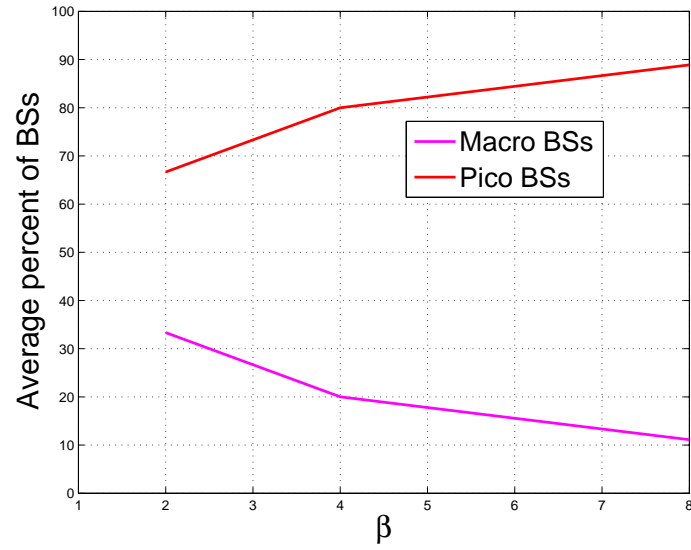


Figure A.26: Porcentaje promedio de macro y pico celdas en la red ( $\beta = 2, 4, 8$ ).

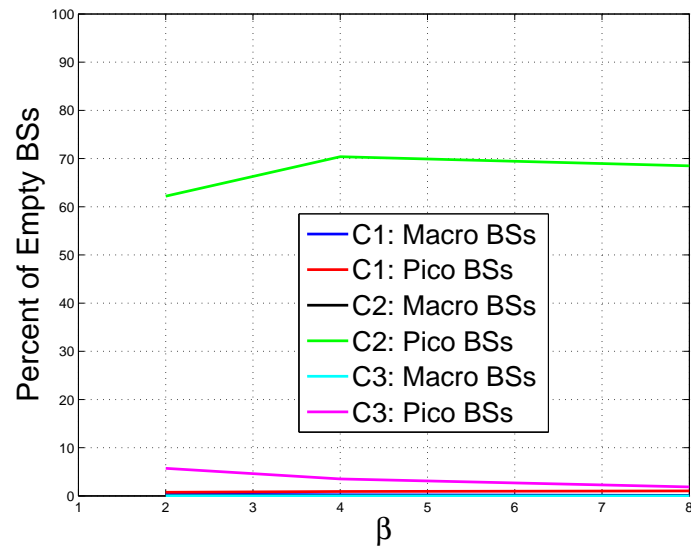


Figure A.27: Porcentaje de macro y pico celdas vacías bajo los criterios C1, C2 y C3 ( $\beta = 2, 4, 8$ ).

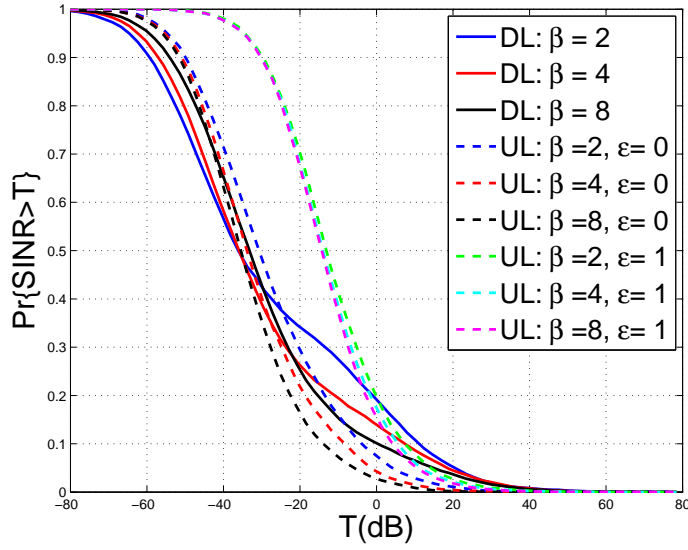


Figure A.28: Impacto de  $\beta$  en las probabilidades marginales de cobertura para el enlace ascendente y descendente bajo el criterio de asociación C1.

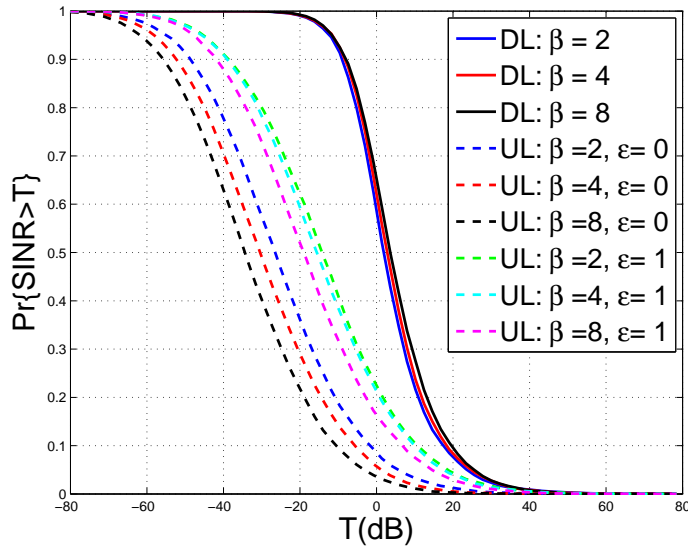


Figure A.29: Impacto de  $\beta$  en las probabilidades marginales de cobertura para el enlace ascendente y descendente bajo el criterio de asociación C2.

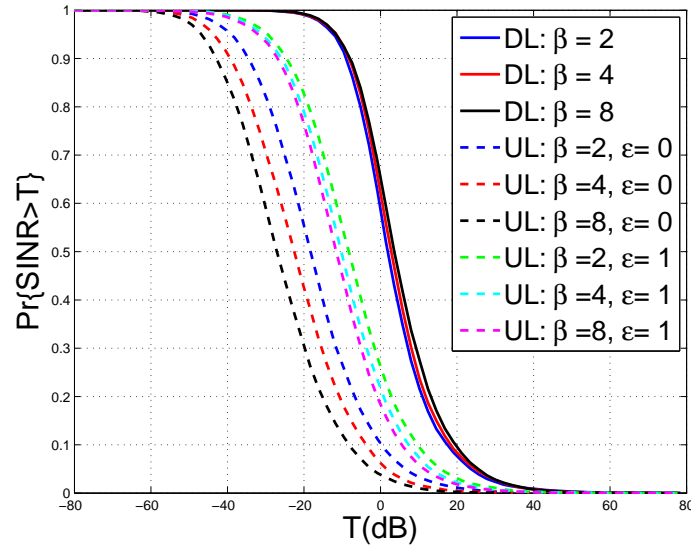


Figure A.30: Impacto de  $\beta$  en las probabilidades marginales de cobertura para el enlace ascendente y descendente bajo el criterio de asociación C3.

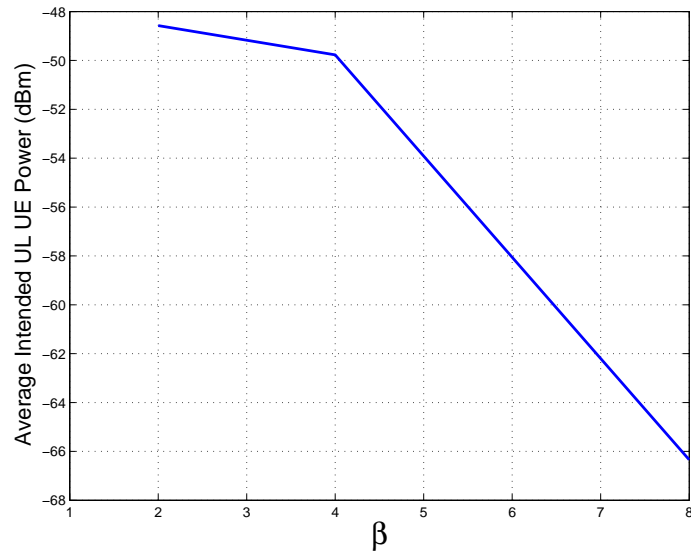


Figure A.31: Promedio de energía en el enlace ascendente (dBm) bajo el criterio C2 sin control de potencia ( $\beta = 2, 4, 8$ ).

están al borde de sus respectivas celdas. Los resultados de probabilidad de cobertura  $P_c^D$  en función de  $\beta$  se muestran en Fig. A.28. Para equipos situados al borde de las celda,  $P_c^D$  es mayor en  $\beta = 8$  que en  $\beta = 2$ . La razón es que con  $\beta = 2$ , muchos UE de borde de celda macro están bastante lejos de sus BS asociadas (mayoritariamente de macroceldas) en comparación con los usuarios de borde de celda para las pico celdas a las que se asocian con  $\beta = 8$ . Este fenómeno tiene el efecto contrario para el interior de la celda para los mismos valores de  $\beta$  debido a la diferencia en la potencia de macro y pico BSs en el enlace descendente.

Respecto al enlace ascendente, a  $\epsilon = 0$  y 1 todos los UEs en UL transmiten con la misma potencia de 0 dBm o 23 dBm respectivamente. Según  $\beta$  aumenta, las macroceldas son reemplazadas por pico BSs, lo que da como resultado que más UEs estén acampados en BS de pico. Sus pérdidas del camino son probablemente más altas que las de UEs conectados a macro celdas para  $\beta = 2$ . Este hecho también es válido para el criterio C3. Por lo tanto, la cobertura  $P_c^U$  se reduce con el aumento de  $\beta$  bajo los criterios C1 y C3 como se muestra en la Fig. A.28 y Fig. A.30, respectivamente.

La cobertura en el enlace descendente  $P_c^D$  para C2 y C3 es la misma y se muestra en la Fig. A.29 y Fig. A.30. A medida que  $\beta$  se incrementa de 2 a 8, las BSs de pico aumentan de 67% a 88% donde como BS macro están disminuyendo de 33% a 12% como se muestra en la Fig. A.26, pero los UE siguen acampando a BS macro a pesar de la disminución en el número de BS macro. Esto aumenta la carga celular, pero disminuye el número de BSs interferentes y, por lo tanto, la cobertura está mejorando con el aumento de  $\beta$  de 2 a 8.

Los resultados con respecto a  $P_c^U$  bajo el criterio C2 sin control de potencia ( $\epsilon = 0$ ) se muestran en Fig. A.29. Bajo los criterios C1 y C3,  $P_c^U$  disminuye a medida que  $\beta$  sube de 2 a 8. La causa es que al reemplazar BSs macro con BSs de pico, en promedio las distancias de UEs a sus BSs asociadas (que siguen siendo macro) aumentan lo que aparentemente reduce la potencia recibida desde los UEs como se muestra en la



Fig. A.31. Consecuentemente, la cobertura  $P_c^U$  disminuye con valores más altos de  $\beta$ .

La Fig. A.32(a) muestra el porcentaje promedio de usuarios conectados a macro y picoceldas. Para el criterio de BS más cercana y  $\beta = 1$ , la mitad de los usuarios están asociados a BS de picoceldas y la otra mitad a BS de macroceldas como se esperaba. A medida que  $\beta$  crece, el porcentaje de usuarios asociados a las células pico también lo hace como la relación  $\frac{\beta}{\beta+1}$ . Para el criterio de pérdida del camino mínima, el comportamiento es similar, aunque la carga para ambos niveles es igual  $\lambda_2 \approx 6\lambda_1$ .

Los resultados de la eficiencia espectral y la tasa binaria se muestran en la Fig. A.32(e) y Fig. A.32(f). A medida que se despliegan más picoceldas y menos macroceldas en el sistema, la eficiencia espectral media  $\eta_{AMC}^D$  para el criterio C1 y  $\eta_{AMC}^U$  y para todos los criterios decrece (Fig. A.32(d)). Sin embargo,  $\eta_{AMC}^D$  crece ligeramente con  $\beta$  al disminuir la interrupción del servicio. El comportamiento de los usuarios en interrupción depende de la asociación de los usuarios a cada capa y el porcentaje de usuarios activos bajo todos los criterios de asociación como se muestra en Fig. A.32(d).

Bajo el criterio C1, a medida que  $\beta$  crece, cada vez más usuarios acampan en picoceldas y experimentan pérdidas altas en comparación con los usuarios asociados a la capa de macroceldas. Consecuentemente, la señal está más atenuada, especialmente en UL. Para el criterio C2, la tasa binaria en el DL,  $R_{AMC}^D$ , es mayor para  $\beta = 1$  ya que la carga es mínima.  $R_{AMC}^D$  disminuye a medida que se intercambian más macroceldas por picoceldas ( $\beta > 1$ ) ya que bajo este criterio los usuarios siguen asociados a macroceldas y el porcentaje de usuarios inactivos crece. El porcentaje promedio de usuarios asociados a ellos disminuye casi linealmente con  $\beta$  debido al efecto de límite de usuarios mencionado anteriormente (aquí  $N_{max} = 60$ ) como se muestra en la Fig. A.32(a). Esos usuarios se vuelven inactivos en lugar de asociados a picoceldas, la mayoría vacías según se pueden ver en Fig. A.32(c). Incluso si la

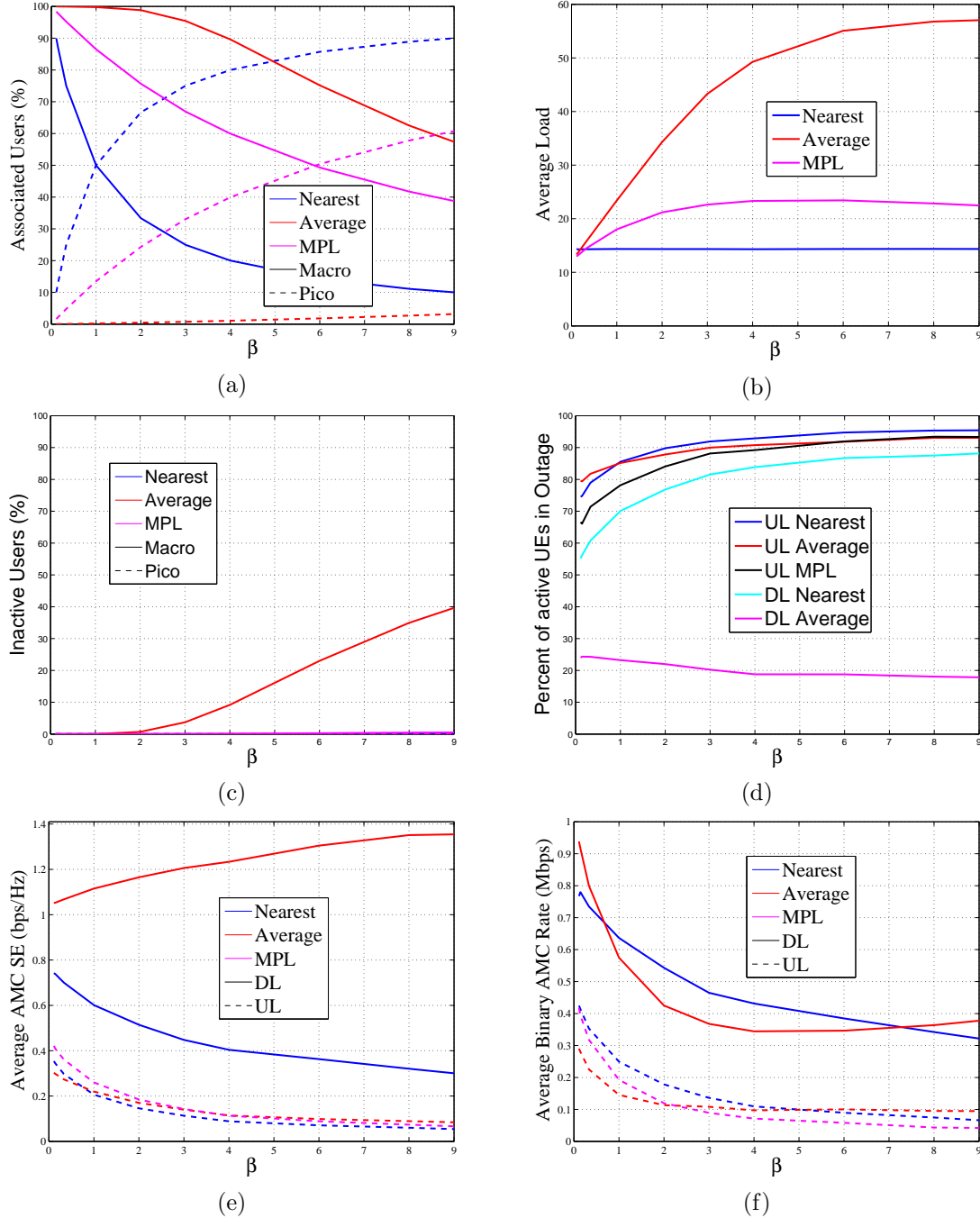


Figure A.32: Rendimiento del sistema en función del cociente entre las densidades de macro y picoceldas,  $\beta = \lambda_p / \lambda_M$ . a) Porcentaje medio de usuarios conectados a las estaciones base. b) Carga media para las BS no vacías. c) Porcentaje medio de usuarios inactivos. d) Porcentaje medio de usuarios en interrupción. e) Eficiencia espectral promedio para AMC; f) Tasa binaria promedio para AMC.

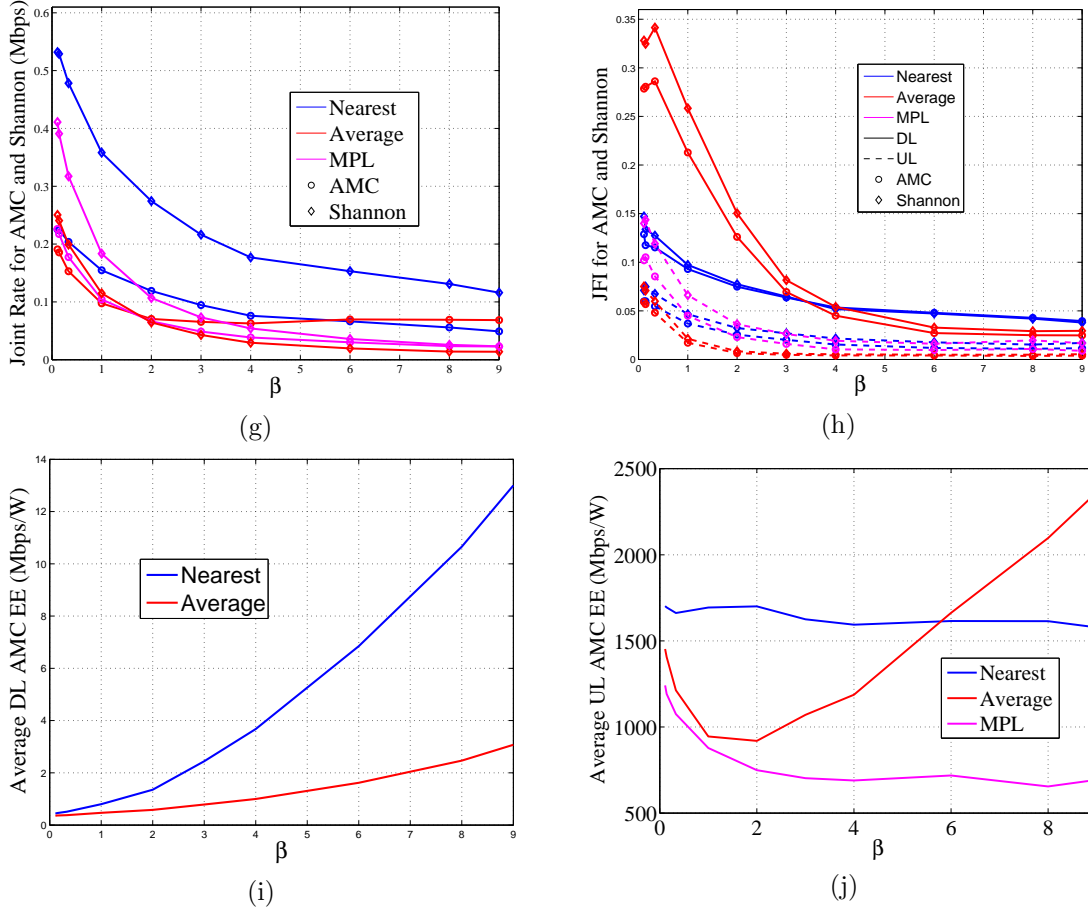


Figure A.32: Rendimiento del sistema en función del cociente entre las densidades de macro y picoceldas,  $\beta = \lambda_p / \lambda_M$ . g) Tasa conjunta promedio para AMC y para el límite de Shannon. h) Índice de Jain para la tasa binaria para AMC y para el límite de Shannon. i) Eficiencia energética media en el DL para usuarios activos para AMC. j) Eficiencia energética media en el UL para usuarios activos para AMC.

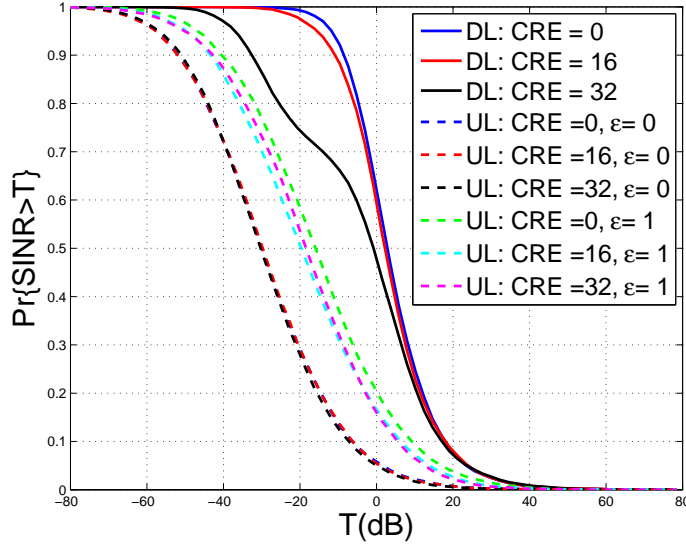


Figure A.33: Impacto en las probabilidades marginales de cobertura de enlace ascendente y descendente para el criterio de asociación C2 con  $\tau = 0dB$ ,  $16dB$  y  $32dB$ .

eficiencia espectral media  $\eta_{AMC}^D$  aumenta con  $\beta$ , sólo cuando hay suficientes picoceldas para descargar a los usuarios de las macroceldas, la tasa promedio comienza a crecer (véase Fig. A.32(e) y Fig. A.32(f)). En general, la eficiencia espectral y la tasa binaria disminuyen ya las picoceldas transmiten menor potencia, y aunque están más cerca de sus usuarios asociados, la potencia que reciben es peor y los interferentes están más cerca. Una razón similar explica el rendimiento observado para la asociación MPL. La tasa conjunta promedio disminuye y también los usuarios son tratados de una manera más injusta (véase Fig. A.32(h) para el índice de Jain).

Fig. A.32(i) y Fig. A.32(j) muestran los resultados de eficiencia energética en función de  $\beta$ . En general, a medida que  $\beta$  aumenta, se asocian más usuarios a las BS de picocelda y, debido a que transmiten con menor potencia, la eficiencia energética del enlace descendente mejora. En el UL,  $EE^U$  disminuye para C1 y C3 y mejora con C2, en correspondencia con la tasa binaria bajo todos los criterios de asociación.

Se muestran ahora los resultados con respecto al efecto del sesgo de expansión

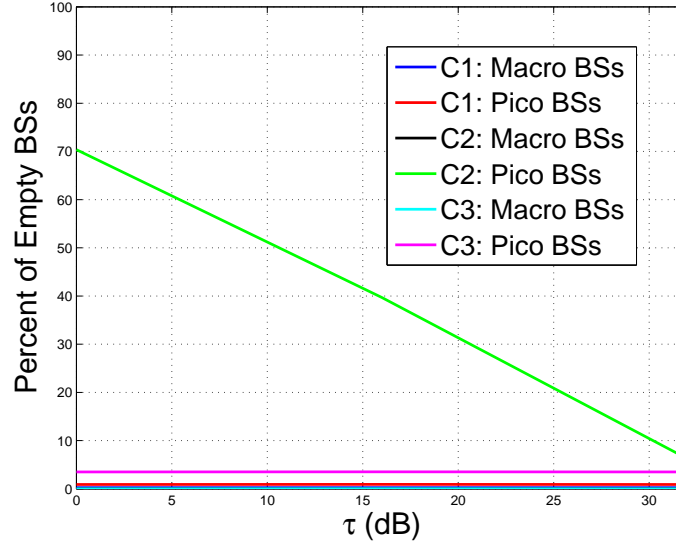


Figure A.34: Porcentaje de BS vacías de macro y pico bajo los criterios C1, C2 y C3 con  $\tau = 0dB$ ,  $16dB$  y  $32dB$ .

del rango de celda. La expansión de rango se aplica como una forma de descargar usuarios de las macros a las picoceldas cuando el criterio de asociación es C2. Los límites del enlace hacia el núcleo de la red o el número máximo de usuarios debido a la señalización no se abordan para estos resultados. Como se muestra en la Fig. A.33, la cobertura de DL se reduce con el aumento de la expansión de picoceldas. Para  $\tau = 32$  dB, casi todas las BSs pico no están ya vacías (véase Fig. A.34), por lo que el número de BSs interferentes ha aumentado con  $\tau$ . De forma similar, los usuarios descargados de sus respectivas BS macro también se enfrentan a interferencias más fuertes además de la menor potencia deseada en el enlace descendente y, en consecuencia, la cobertura de DL se reduce. Este fenómeno de interferencia puede minimizarse utilizando técnicas de gestión de interferencias.

En el enlace ascendente, la cobertura  $P_c^U$  también se reduce con una CRE más alta. Al incrementar  $\tau$ , el número de UEs interferentes crece y los usuarios asociados con BS pico sesgadas transmiten con mayor potencia también porque están más alejados de sus BSs deseadas, produciendo una interferencia alta en el enlace ascendente

particularmente para valores mayores de  $\epsilon$ . También hay que tener en cuenta que al aumentar  $\tau$ , el 40% de UEs se han descargado de macro a pico celdas y casi todas las BS no están vacías. El control de potencia controlado por interferencias puede mejorar el rendimiento del enlace ascendente.

El impacto de la aplicación de la expansión del rango de celda al criterio de BS de mejor potencia media con el fin de descargar a los usuarios de las BS de macrocelda hacia las picoceldas se muestra en la A.35. Se muestran también los resultados para los criterios de BS más cercana y pérdidas en el camino mínimas, a las que no se les aplica la extensión, como comparación. Con respecto a los parámetros del sistema distintos de los valores por defecto, los valores  $\tau$  específicos cambian con la relación de densidad de usuario  $\gamma$  y con el límite de usuarios activos  $N_{max}$  pero el rendimiento cualitativo para otros pares de valores es similar.

Por lo general, el objetivo de la expansión del rango de celda es compartir los usuarios por igual entre las capas de la red. Desde  $\tau = 0$  (sin expansión de rango), cualquier incremento en el sesgo descarga a los usuarios de las macroceldas a las picoceldas. Si las pérdidas de trayecto fueran idénticas, la expansión de rango que conseguiría el reparto a partes iguales de los usuarios sería la diferencia entre potencias más ganancias de antena,  $35dB$ . El hecho de tener pérdidas de trayecto distintas modifican ligeramente el valor a  $\tau \approx 39dB$ .

Con el aumento de  $\tau$ , la eficiencia espectral se reduce a medida que más y más usuarios ubicados en el borde de células pico se asocian a picoceldas y pasan a estar en interrupción, como se muestra en la Fig. A.35(d). Como contrapeso, la carga media del usuario disminuye drásticamente. Como resultado, la velocidad de datos en el DL aumenta. Los usuarios comienzan a ser tratados de una manera más justa aunque pronto (por encima de  $30dB$ ) el índice de Jain comienza a disminuir. Cuando el sesgo es de  $50dB$  o superior, la eficiencia espectral es demasiado baja (la mitad del valor de  $\tau = 0$ ) mientras que la carga no disminuye ya que la mayoría de los usuarios están

asociados a picoceldas (80%). Un sesgo tan alto obliga a los usuarios a asociarse a BSs de pico a las que tienen un canal de mala calidad. Como resultado, la tasa comienza a disminuir a partir de un sesgo de  $64dB$ . Respecto al UL, en general el efecto de la expansión de rango es acercar a los usuarios a sus BSs. Sin embargo, en este caso no se observa un aumento claro en la tasa binaria. El mismo comportamiento cualitativo se puede observar para otros valores de  $\gamma$  y  $N_{max}$  si bien los valores específicos de sesgo. La eficiencia energética aumenta tanto en el UL como en el DL a medida que los usuarios son descargados de las macro a las picoceldas. Este efecto se muestra en la Fig. A.35(i) y Fig. A.35(j), respectivamente.

### **Efecto del control de potencia fraccional en el enlace ascendente**

En esta sección, se evalúa el efecto del índice de control de potencia fraccional  $\epsilon$ . Fig. A.36 muestra la eficiencia espectral media y la tasa de datos binarios conjunta para los tres criterios de asociación considerados en este trabajo. Como la tasa conjunta se ha considerado la tasa binaria mínima tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente, su resultado es siempre menor que la tasa marginal para el UL. La mejora en la tasa de  $\epsilon = 0$  a  $\epsilon = 0.2$  y de  $\tau = 0dB$  a  $32dB$  es clara. Un aumento adicional del índice de control de potencia no mejora el rendimiento ya que para la mayoría de los usuarios se alcanza la máxima potencia de transmisión  $P_{max}$ .

En cuanto a la equidad en el reparto, la Fig. A.38 muestra el índice de Jain para la tasa binaria en el UL en función de  $\epsilon$ . Se han considerado dos sesgos diferentes  $\tau = 0$  dB y  $\tau = 32$  dB. Sin expansión de rango, el tratamiento dado por el criterio C2 (UL acoplado a la potencia máxima recibida de DL) es pobre comparado con las pérdidas de trayecto mínimas o por el criterio de BS más cercanas. Sin embargo, su rendimiento mejora si se añaden 32 dB de sesgo al cálculo de potencia recibida de las picoceldas (Fig. A.38(b)) para alcanzar valores similares a los otros dos criterios. Los usuarios asociados con BS pico por sesgo transmiten con mayor potencia porque

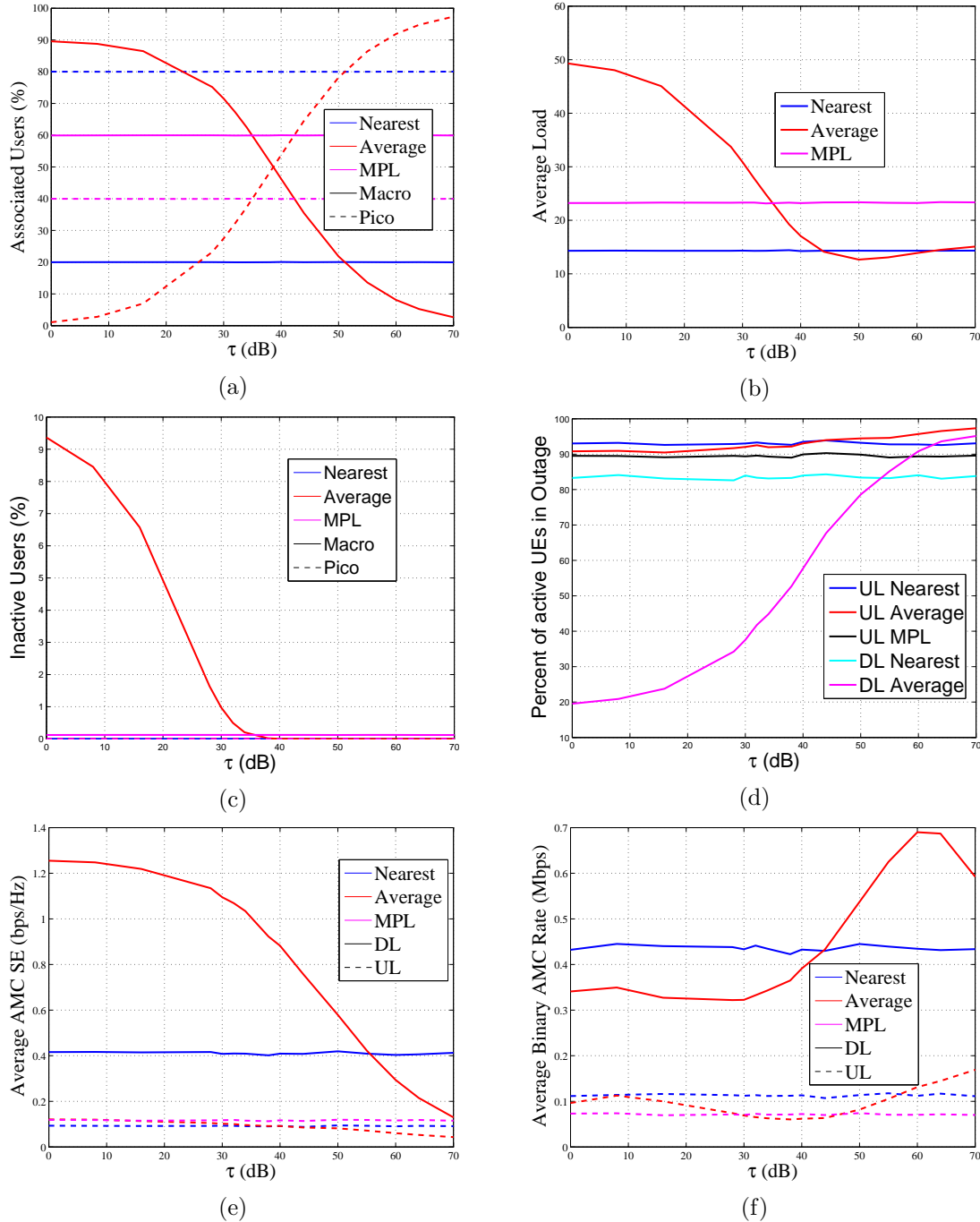


Figure A.35: Rendimiento del sistema en función del sesgo de expansión de celda,  $\tau$ . aa) Porcentaje medio de usuarios conectados a las estaciones base. b) Carga media para las BS no vacías. c) Porcentaje medio de usuarios inactivos. d) Porcentaje medio de usuarios en interrupción. e) Eficiencia espectral promedio para AMC; f) Tasa binaria promedio para AMC.



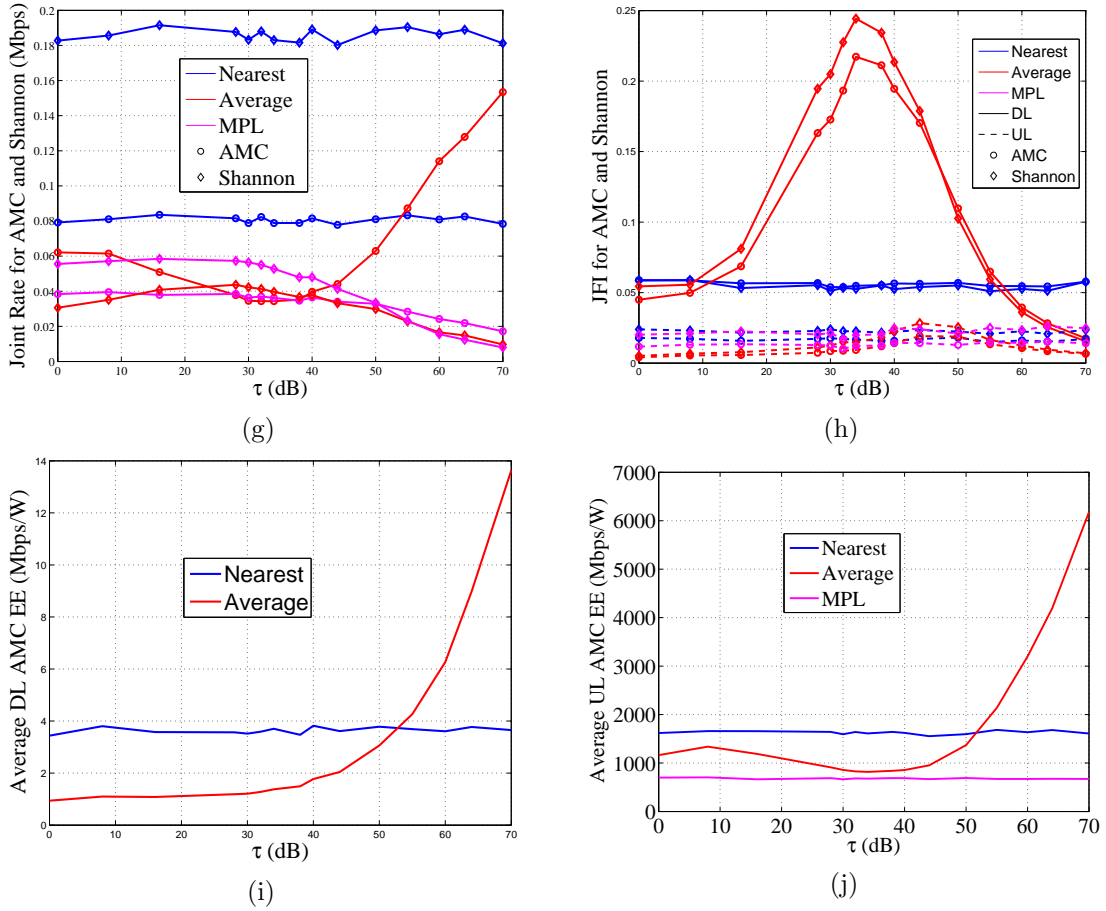


Figure A.35: Rendimiento del sistema en función del sesgo de expansión de celda,  $\tau$ . g) Tasa conjunta promedio para AMC y para el límite de Shannon. h) Índice de Jain para la tasa binaria para AMC y para el límite de Shannon. i) Eficiencia energética media en el DL para usuarios activos para AMC. j) Eficiencia energética media en el UL para usuarios activos para AMC.

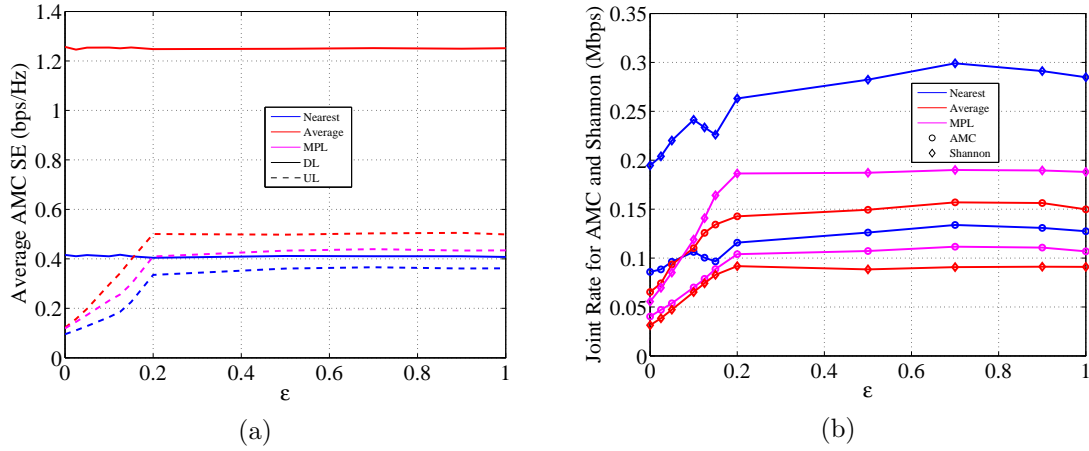


Figure A.36: Rendimiento del sistema en función del índice del control de potencia,  $\epsilon$ . No se ha considerado expansión del rango de celda ( $\tau = 0$ ). a) Eficiencias espectrales promedio para AMC. (Los resultados para DL, que no son función de  $\epsilon$ , se muestran como referencia.) b) Tasa conjunta promedio para AMC y para el límite de Shannon.

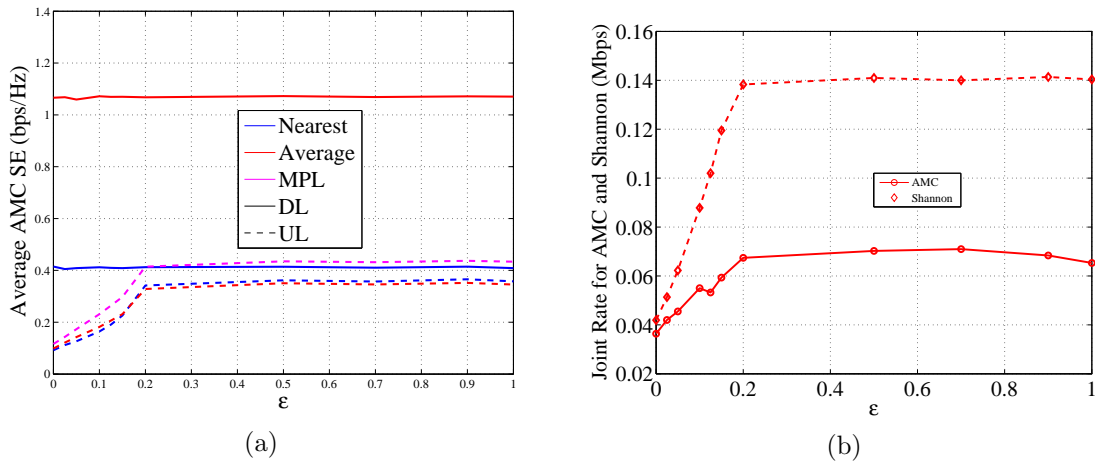


Figure A.37: Rendimiento del sistema en función del índice del control de potencia,  $\epsilon$ . Se ha considerado expansión del rango de celda ( $\tau = 32$ ). a) Eficiencias espectrales promedio para AMC. (Los resultados para DL, que no son función de  $\epsilon$ , se muestran como referencia.) b) Tasa conjunta promedio para AMC y para el límite de Shannon.

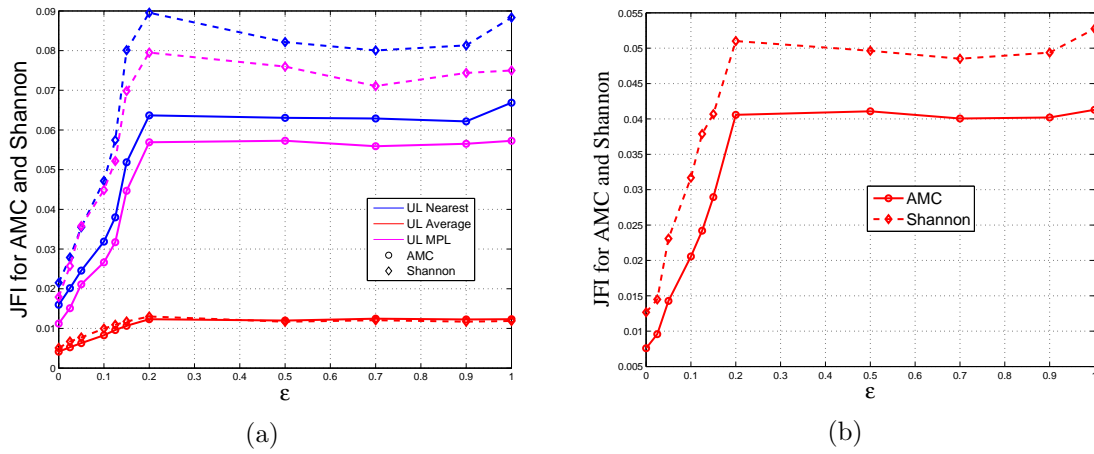


Figure A.38: índice de Jain en función del índice del control de potencia,  $\epsilon$ , para el criterio de mejor potencia media (C2). a)  $\tau = 0dB$  (sin expansión de rango). b)  $\tau = 32dB$ .

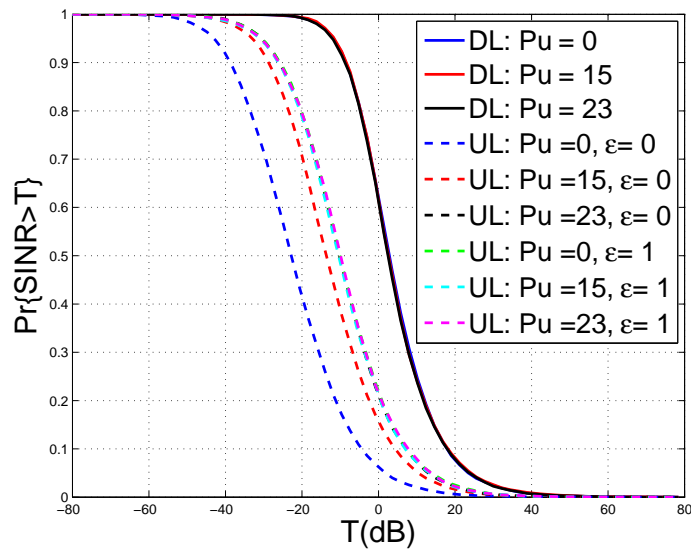


Figure A.39: Impacto en la probabilidad marginal de cobertura del enlace ascendente para el criterio de asociación C3 con  $P_u = 0dBm$ ,  $15dBm$  y  $23dBm$ .

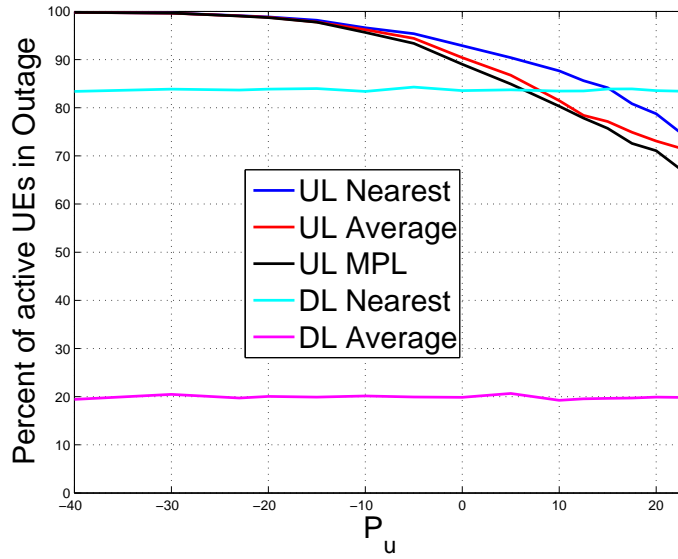
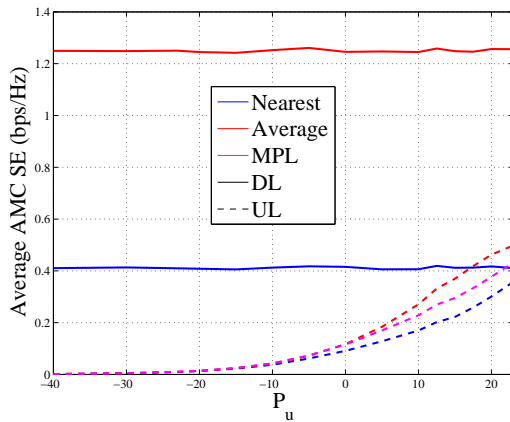
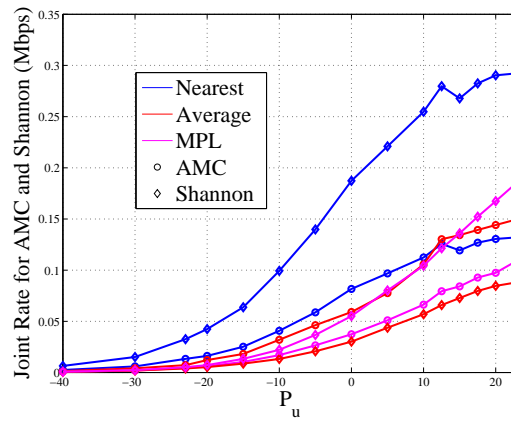


Figure A.40: Promedio de porcentaje de usuarios en interrupcin en funcin de  $P_u$ .



(a)



(b)

Figure A.41: Rendimiento del sistema en funcin de la potencia de usuario en bucle abierto,  $P_u$  sin control de potencia. a) Eficiencias espectrales promedio para AMC. (Los resultados para DL, que no son funcin de  $P_u$ , se muestran como referencia.); b) Tasa conjunta promedio para AMC y para el lmite de Shannon.

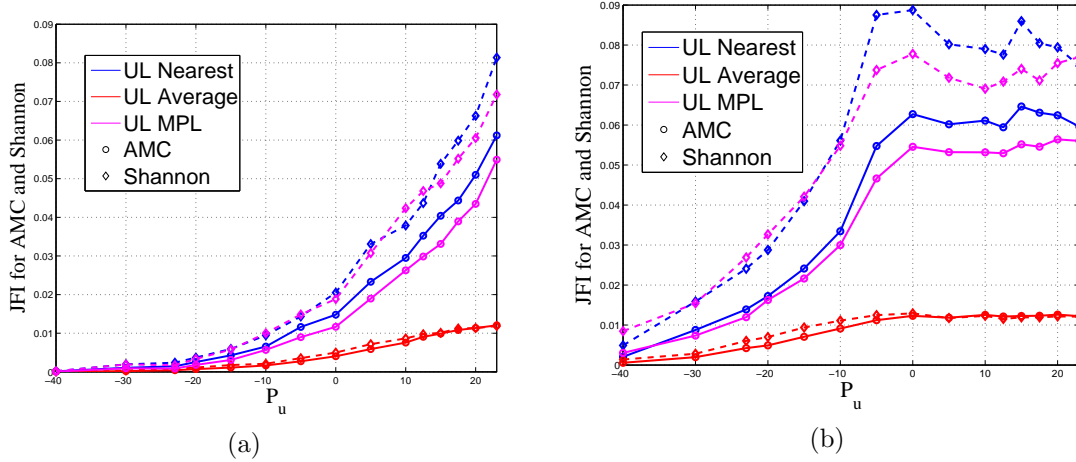


Figure A.42: índice de Jain en función de la potencia de transmisión del usuario en bucle abierto,  $P_u$ , para el criterio de mejor potencia media (C2). a)  $\epsilon = 0$  (sin control de potencia); b)  $\epsilon = 0.2$ .

están más alejados de su BS deseada, produciendo una interferencia alta en el enlace ascendente. Este efecto es particularmente notable para valores más altos de  $\epsilon$  si la potencia máxima no estuviera limitada.

Los resultados anteriores se analizaron con potencia de transmisión en bucle abierto  $P_u = 0\text{dBm}$ . Se va a evaluar ahora el efecto de  $P_u$  mientras se mantiene la máxima potencia de transmisión del usuario como  $P_{max} = 23\text{dBm}$ .

La cobertura en el UL  $P_c^U$  mejora con el aumento de la potencia de transmisión en bucle abierto  $P_u$  de  $0\text{dBm}$  a  $23\text{dBm}$  ya que la potencia deseada en sus BS asociadas mejora. Cuando  $P_u = 23\text{dBm}$ , la cobertura UL es equivalente a la cobertura UL obtenida con  $\epsilon = 1$  bajo todos los criterios de asociación porque a los UEs transmiten siempre con la potencia máxima de  $23\text{dBm}$ . Los resultados con respecto al efecto de  $P_u$  sobre la cobertura bajo el criterio C3 se muestran en la Fig. A.39. Hay una mejora en la eficiencia espectral a medida que la potencia deseada de los usuarios en sus BS asociadas aumenta y los usuarios salen de la interrupción como se muestra en la Fig. A.40. Los resultados de la Fig. A.41 muestra que para  $\epsilon = 0$  (sin control de

potencia) la tasa binaria aumenta con  $P_u$  hasta que se alcanza  $P_{max}$ .

En cuanto a la equidad en el reparto, todos los criterios obtienen mejores resultados a medida que crece la potencia de transmisión (ver Fig. A.42). Usando el control de potencia (Fig. A.42(b)), el índice de Jain mejora para potencias de transmisión más bajas.

## A.6 Conclusiones y líneas futuras

### A.6.1 Resumen

En esta tesis doctoral se han analizado diversos indicadores de rendimiento de redes celulares heterogéneas bajo diversos criterios de acoplamiento y asociación. Los indicadores de rendimiento que se han estudiado incluyen la distribución conjunta de las relaciones señal a ruido más interferencia de los enlaces ascendente y descendente junto con las distribuciones marginales, la eficiencia espectral simétrica, la velocidad binaria simétrica (en media y su índice de Jain) y la eficiencia energética.

Se ha considerado una red celular heterogénea de dos capas con estaciones base de macro y picoceldas y usuarios distribuidos uniformemente. Se han tenido en cuenta los modelos de pérdida del camino realistas dados por 3GPP para los niveles macro y pico.

En este trabajo, se han utilizado tres criterios de asociación para asociar usuarios a macro o pico celdas. Los criterios de asociación que se han investigado incluyen criterios acoplados entre el enlace ascendente y descendente y también desacoplados. Los criterios de asociación acoplados abarcan la selección de la estación base más cercana (C1) y de la estación base que se recibe con mayor potencia promedio en el DL (C2) más cercanos, mientras que en los criterios de asociación disociados, los usuarios se asociaron en el enlace descendente por potencia recibida máxima y en el UL por pérdidas del camino mínimas (C3).

A diferencia de las redes homogéneas, las redes heterogéneas presentan una carga desequilibrada bajo criterios de potencia de recepción media de enlace descendente máximos debido a la diferencia en la potencia de las macro y las pico celdas. Con el fin de equilibrar la carga, se ha tenido en cuenta la expansión de la celda (Cell Range Expansion, CRE). Se ha incluido también otra técnica conocida como control de potencia fraccional (Fractional Power Control, FPC) que compensa las pérdidas del camino de los usuarios hacia sus BS asociadas. Dado que la estrategia de asociación tiene relación con las estadísticas de distancia, se ha analizado la influencia de los criterios de asociación en el control de potencia.

En primer lugar, se han evaluado los resultados numéricos de las distribuciones marginal y conjunta de la SINR en los enlaces ascendente/descendente, considerando los criterios de asociación acoplados y desacoplados.

Posteriormente, se ha analizado la eficiencia espectral simétrica que satisface simultáneamente los requisitos del enlace ascendente y del enlace descendente. Se ha considerado el uso de modulación y codificación adaptativas con umbrales de SINR realistas obtenidas de un simulador de enlace LTE. Los resultados han mostrado una notable falta de independencia y se ha adivinado correlación entre las coberturas del enlace ascendente y del enlace descendente incluso bajo desvanecimientos Rayleigh independientes. Se analizó el complejo equilibrio de los parámetros de diseño de red para obtener la mejor eficiencia espectral simétrica. Se encontró una mejor eficiencia espectral simétrica con el criterio C2 con control parcial de potencia fraccional. Además, asociar el usuario a la BS recibida con una potencia media más alta en el DL y pérdidas de camino mínima en el UL (C3) sólo mejora la eficiencia espectral simétrica respecto al criterio C2 para valores de eficiencia espectral pequeños.

Posteriormente, se han presentado resultados de simulación para la cobertura y varias otras medidas de rendimiento bajo un conjunto de parámetros de sistema mencionados en la Tabla 5.1. Esto ha permitido obtener información sobre el impacto

de la variación de cada parámetro en el rendimiento del sistema. Los resultados de las simulaciones han mostrado que tener en cuenta los límites de la eficiencia espectral y del número de usuarios activos simultáneamente dentro de una celda modifican de forma notable los resultados de la tasa binaria conjunta. Los resultados de la simulación muestran que aunque la eficiencia espectral de DL es máxima para el criterio por potencia promedio, la tasa binaria de DL no es necesariamente más alta que la asociación a la BS más cercana, ya que se alcanza fácilmente la carga máxima por celda y muchos usuarios asociados a las macroceldas están inactivos. Si se selecciona como criterio de asociación, se recomienda añadir un sesgo de expansión de rango de celda para repartir los usuarios de forma más equilibrada entre capas de la red.

También se han estudiado otros parámetros de la red, como el número medio de usuarios por celda. Reducir  $\gamma = \frac{\lambda_u}{\lambda_{BS}}$ , es decir, desplegar una infraestructura más densa aumentando el número total de BS, no sólo mejora las tasas promedio, sino también la eficiencia energética y la equidad entre usuarios. Una reducción de  $\gamma$  de 10 a 5 aumenta ligeramente la tasa promedio conjunta y la eficiencia energética, pero la mejora en la equidad es notable, ya que el índice de Jain se multiplica por 20. Cuando crece el número de usuarios que pueden estar simultáneamente activos en una celda,  $N_{max}$ , la tasa conjunta promedio no mejora y la eficiencia energética se reduce aunque el tratamiento es más justo ya que se deja a menos usuarios sin ningún recurso en absoluto.

Se ha mostrado que la inclusión de más picoceldas (manteniendo la densidad total de BSs) no tiene interés para la tasa media y la equidad bajo el criterio de asociación a la BS con mejor potencia promedio debido principalmente a la alta diferencia de potencia entre ambas capas. Sin embargo, la eficiencia energética mejora ligeramente a medida que más usuarios se inactivan. La cobertura también se reduce con la adición de más picoceldas (aumento en  $\beta$ ) debido a que más usuarios están asociados a



picoceldas, que experimentan mayores pérdidas de camino. El sesgo de expansión del rango de la celda ( $\tau$ ) utilizado en el criterio C2 reduce la cobertura, pero la equidad es máxima para valores medios y la eficiencia energética, así como la tasa binaria mejor mucho más allá de los valores medios.

Por último, un ligero incremento del índice del control de potencia  $\epsilon$  de 0 a 0.2 mejora la tasa binaria conjunta a la vez que proporciona un trato más justo entre usuarios. Por otra parte, para los modelos de pérdida de camino del 3GPP, parece que la asociación DL/UL desacoplada no mejora los resultados suficientemente para compensar las dificultades de su implementación. En conclusión, para un límite en los usuarios activos por celda  $N_{max} = 30$ , los mejores resultados para el modelo de sistema considerado se obtienen bajo criterios de asociación promedio C2 cuando el número medio de usuarios en el sistema es 5 veces el de BSs ( $\gamma = 5$ ), mientras que hay 4 veces más picoceldas que macroceldas ( $\beta = 4$ ), se emplea control de potencia fraccionario con índice  $\epsilon = 0.2$ , potencia de bucle abierto para los UE  $P_u = 0dBm$ , y extensión de rango  $32 \leq \tau \leq 64$ .

### A.6.2 Líneas futuras de trabajo

Esta tesis ha puesto de relieve el rendimiento de las redes celulares heterogéneas bajo diversos criterios de acoplamiento y asociación. Debido a la complejidad de estas redes, el trabajo de investigación se está realizando actualmente es enorme. Esta tesis ha revelado algunas direcciones prometedoras para la investigación que se enumeran a continuación.

- En esta tesis se han considerado tres criterios de asociación: a la estación base más cercana, a la de mejor potencia promedio en el DL y UL acoplado, y a la de mejor potencia promedio en el DL y a la de pérdidas mínimas del camino en el UL. Sin embargo, se pueden considerar otros criterios de asociación para

trabajos futuros en los que la elección de BS de servicio se realiza en función de la potencia de señal recibida instantáneamente. Esto obliga a una selección dinámica de celda [43] que será posible realizar mediante una comunicación intensiva entre celdas.

- Se han desarrollado en los últimos años técnicas que permiten mejorar el rendimiento de los sistemas inalámbricos mediante la transmisión en modo dúplex completo (Full Duplex, FD). Hasta hace poco, se consideraba que era imposible realizar en radio comunicaciones bidireccionales en los mismos recursos temporales y espectrales. Sin embargo, las mejoras en las tecnologías de cancelación de eco las hacen posibles [44].

En este trabajo se han estudiado redes celulares heterogéneas bajo el modo semidúplex (Half Duplex, HD). El rendimiento de las redes celulares heterogéneas en modo dúplex completo bajo criterios de asociación a celdas acoplados y desacoplados podría ser un área para la exploración futura.

- Se ha asumido que los recursos de la celda se comparten por igual entre el conjunto activo de usuarios asociados a una BS específica. De forma similar, también se ha asumido que todas las colas para la transmisión de enlace descendente y de enlace ascendente están saturadas, es decir, cada BS y UE siempre tiene datos para transmitir. Estas suposiciones pueden no ser realistas. Tener en cuenta la dinámica de colas en cada BS, junto con una asignación de recursos ajustada a las condiciones del canal podría ser una nueva dirección de investigación en el análisis de la asociación a las celdas.
- El impacto del mecanismo de control de potencia que compensa las pérdidas de trayecto entre UEs y BSs en enlace ascendente, conocido como control de potencia fraccional, ha sido investigado en este trabajo. Sin embargo, no se han considerado mecanismos de control de potencia en el enlace descendente.

En particular la técnica conocida como asignación de potencia (power setting) asigna una potencia diferente a cada BS, si bien esta es la misma para todos los usuarios de la celda. Puede analizarse si esta característica evita problemas de interferencia en las celdas vecinas y mejora el rendimiento del sistema.

- Para minimizar la pérdida de datos, son necesarios los reconocimientos que se proporcionan a través de realimentación en la dirección contraria del enlace. Cuando la asociación está desacoplada, es necesario que la BS asociada al UL envíe estos reconocimientos (ACKnowledgments, ACKs) a la BS asociada en el DL, que debe retransmitir los datos en caso necesario. Esto introduce cierto retardo que puede limitar aún más la ganancia por desacoplar los enlaces ascendente y descendente en la transmisión. El efecto de este retraso o latencia puede ser abordado en el futuro.

## *A.6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS*

---

# Bibliography

- [1] J. Acharya, L. Gao, and S. Gaur, “Heterogeneous Networks in LTE-Advanced,” John Wiley & Sons, Ltd., 2014.
- [2] X. Chu, D. Lopez-Perez, Y. Yang and S. Gunnarsson, “Heterogeneous Cellular Networks: Theory, Simulation and Deployment,” Cambridge University Press, 2013.
- [3] A. Ghosh, N. Mangalvedhe, R. Ratasuk, B. Mondal, M. Cudak, E. Visotsky, T. A. Thomas, J. G. Andrews, P. Xia, H. S. Jo, H. S. Dhillon, T. D. Novlan, “Heterogeneous Cellular Networks: From Theory to Practice,” IEEE Communications Magazine, vol. 50, no. 6, pp. 54–64, June 2012.
- [4] S. Mukherjee, “Analytical Modeling of Heterogeneous Cellular Networks: Geometry, Coverage, and Capacity” Cambridge University Press, 2014.
- [5] H. Elshaer, F. Boccardi, M. Dohler, R. Irmer, “Downlink and uplink decoupling: A disruptive architectural design for 5G networks,” Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference, pp. 1798–1803, December 2014.
- [6] F. Boccardi, J. Andrews, H. Elshaer, M. Dohler, S. Parkvall, P. Popovski, S. Singh, “Why to decouple the uplink and downlink in cellular networks and how to do it,” IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 3, pp. 110–117, March 2016.

- [7] K. Smiljkovicj, P. Popovski, L. Gavrilovska, "Analysis of the Decoupled Access for Downlink and Uplink in Wireless Heterogeneous Networks," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 173–176, April 2015.
- [8] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song, and D. Malladi, "A survey on 3GPP heterogeneous networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 10–21, June 2011.
- [9] K. Yang, P. Wang, X. Hong, X. Zhang, Joint downlink and uplink network performance analysis with CRE in heterogeneous wireless network, *IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1659-1663, 30 Aug.- 2 Sept. 2015.
- [10] S. Singh, H. S. Dhillon, J. G. Andrews, "Offloading in heterogeneous networks: Modeling, analysis, and design insights," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 5, pp. 2484–2497, May 2013.
- [11] S. Singh, J. G. Andrews, "Joint Resource Partitioning and Offloading in Heterogeneous Cellular Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 2, pp. 888–901, February 2014.
- [12] T.D. Novlan, H.S. Dhillon, J.G. Andrews, "Analytical modeling of uplink cellular networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 6, pp. 2669–2679, June 2013.
- [13] H. S. Dhillon, T. D. Novlan, J. G. Andrews, "Coverage probability of uplink cellular networks," In *Proceedings of IEEE global communications conference (GLOBECOM)*, Anaheim, CA, pp. 2179-2184, December 2012.
- [14] N. Jindal, S. Weber, J. Andrews, Fractional Power Control for Decentralized

- Wireless networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 12, pp. 5482-5492, December 2008.
- [15] M. Coupechoux, J. Kelif, How to set the fractional power control compensation factor in LTE?, *IEEE 34th Sarnoff Symposium*, pp. 15, 2011.
- [16] P. Guan, M. Di Renzo, Uplink cellular networks with fractional power control and optimum combining, *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, 2016.
- [17] M. Haenggi, “Stochastic Geometry for Wireless Networks” Cambridge University Press, 2013.
- [18] H. ElSawy, E. Hossain, M. Haenggi, Stochastic geometry for modeling, analysis, and design of multi-tier and cognitive cellular wireless networks: A survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 9961019, September 2013.
- [19] H.S. Jo, Y.J. Sang, P. Xia, J.G. Andrews, “Heterogeneous cellular networks with flexible cell association: a comprehensive downlink SINR analysis,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 8, pp. 3484–3495, October 2012.
- [20] S.M. Yu, S.L. Kim, “Downlink capacity and base station density in cellular networks,” *Proceedings of Workshop on Spatial Stochastic Models for Wireless Networks*, May 2013.
- [21] K. Smiljkovikj, L. Gavrislovska, P. Popovski, “Efficiency analysis of downlink and uplink decoupling in heterogeneous networks,” *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, pp. 1–6, 2015.

- [22] D. Colombi, B. Thors, C. Trnevik, "Implications of EMF exposure limits on output power levels for 5G devices above 6 GHz," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 1247–1249, February 2015.
- [23] F. J. Martin-Vega, G. Gomez, M. C. Aguayo-Torres, M. Di Renzo, Analytical Modeling of Interference Aware Power Control for the Uplink of Heterogeneous Cellular Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 10, pp. 6742-6757, October 2016.
- [24] H. S. Dhillon, R. K. Ganti, F. Baccelli, J. G. Andrews, "Modeling and Analysis of K-Tier Downlink Heterogeneous Cellular Networks," *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*, vol. 30, no. 3, pp. 550–560, APRIL 2012.
- [25] R. Q. Hu, Y. Qian, "An Energy Efficient and Spectrum Efficient Wireless Heterogeneous Network Framework for 5G Systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 94–101, May 2014.
- [26] S. Singh, X. Zhang, J. G. Andrews, "Joint rate and SINR coverage analysis for decoupled uplink-downlink biased cell associations in HetNets," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 10, pp. 5360–5373, October 2015.
- [27] ETSI 3GPP TR 36.931, "Evolved Universal Terrestrial radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) requirements for LTE Pico Node B," 2011.
- [28] 3GPP TS 36.201, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE physical layer; General description," 2014.
- [29] M.C. Aguayo-Torres, F. Blaquez-Casado, I.M. Delgado-Luque, J.T. Entrambasaguas, G. Gomez, F.J. Martin-Vega, D. Morales-Jimenez, J.J.



- Sanchez-Sanchez, "WM-SIM LTE Link Simulator Version 2," available at <http://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/11057>, 2016.
- [30] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, J. C. Zhang, "What Will 5G Be?," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, June 2014.
- [31] J. G. Andrews; F. Baccelli; R. K. Ganti, "A Tractable Approach to Coverage and Rate in Cellular Networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 11 pp.3122–3134, October 2011.
- [32] A. Goldsmith, "Wireless Communications," Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2005.
- [33] C. L. I, C. Rowell, S. Han, Z. Xu, G. Li, and Z. Pan, Towards Green and Soft: A 5G perspective, *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 66–73, February 2014.
- [34] A. A. Abdulkafi, S.K. Tiong, D. Chieng, A. Ting, A. M. Ghaleb, J. Koh, "Modeling of Energy Efficiency in Heterogeneous Network," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 6, no. 17, pp. 3193–3201, September 2013.
- [35] W. Wang and G. Shen, "Energy Efficiency of Heterogeneous Cellular Network," *IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall)*, pp. 15, September 2010.
- [36] H. Claussen, L. T. W. Ho, and F. Pivit, "Effects of joint macrocell and residential picocell deployment on the network energy efficiency, *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1-6, September 2008.

- [37] S. Cho and W. Choi, "Energy-Efficient Repulsive Cell Activation for Heterogeneous Cellular Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 5, pp. 870882, May 2013.
- [38] L. Saker, S. E. Elayoubi, L. Rong, and T. Chahed, "Capacity and Energy Efficiency of Picocell Deployment in LTE-A Networks," *IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 15, May 2011.
- [39] X. Wu, S. Tavildar, S. Shakkottai, T. Richardson, J. Li, R. Laroia, A. Jovicic, FlashLinQ: A Synchronous Distributed Scheduler for Peer-to-Peer Ad Hoc Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 21, no. 4, pp. 1215-1228, August 2013.
- [40] A. Ghosh, J. Zhang, J. G. Andrews, R. Muhamed, "Fundamentals of LTE," Prentice Hall, 2010.
- [41] 3GPP, "TR 36.814 v.1.5.2: further advancements for E-UTRA," December, 2009.
- [42] M. M. Shaikh, M. C. Aguayo-Torres, "Joint Uplink/Downlink Coverage and Spectral Efficiency in Heterogeneous Cellular Network," *Springer Wireless Personal Communications Journal*, 2016, DOI 10.1007/s11277-016-3889-1.
- [43] S. Corroy, L. Falconetti, R. Mathar, Cell association in small heterogeneous networks: Downlink sum rate and min rate maximization, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, April 2012.
- [44] J. Lee, T. Quek, Hybrid Full-/Half-Duplex System Analysis in Heterogeneous Wireless Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 5, pp. 2883-2895, January 2015.